

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ УКРАИНЫ  
НАЦИОНАЛЬНЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ  
„Харьковский политехнический институт”

**Г.М. Сучков, Е.Л. Ноздрачева**

## **АКУСТИЧЕСКИЙ КОНТРОЛЬ**

Учебное пособие

Утверждено  
редакционно-издательским  
советом университета,  
протокол № 2 от 06.12.12 г.

Харьков  
НТУ „ХПИ”  
2013

УДК 620.179.17(072)

ББК 22.32

С 91

*Рецензенты:*

*В. А. Стороженко, д-р техн. наук, проф., ХНУРЕ;*

*П. И. Стоев, д-р физ.-мат. наук, проф., ННЦ «ХФТИ» НАНУ.*

Навчальний посібник містить теоретичні та практичні основи, технологічні та методичні положення акустичного контролю матеріалів і виробів.

Призначено для студентів спеціальності «Прилади та системи неруйнівного контролю» денної та заочної форм навчання.

**Сучков Г.М.**

С 91 Акустический контроль : учеб. пособ. / Г.М. Сучков, Е.Л. Ноздрачева. – Х. : НТУ «ХПИ», 2013. – 138 с.

**ISBN**

Учебное пособие содержит теоретические и практические основы, технологические и методические положения акустического контроля материалов и изделий.

Предназначено для студентов специальности «Приборы и системы неразрушающего контроля» дневной и заочной форм обучения.

Ил. 81. Табл. 17. Библиогр. 8 названий

**УДК 620.179.17(072)**

**ББК 22.32**

© Г.М. Сучков, Е.Л. Ноздрачева, 2013.

© НТУ «ХПИ», 2013.

**ISBN**

## **ВВЕДЕНИЕ**

В настоящее время широко применяют различные методы и средства неразрушающего контроля изделий, позволяющие проверять качество продукции без нарушения ее пригодности к использованию по назначению.

Все дефекты, как известно, вызывают изменение физических характеристик металлов и сплавов: плотности, электропроводности, магнитной проницаемости, упругих свойств и т.д. Исследование изменений характеристик металлов и выявление дефектов, что являются причиной этих изменений, составляет физическую основу методов неразрушающего контроля. Эти методы основаны на использовании проникающих излучений рентгеновских и гамма-лучей, ультразвуковых и звуковых колебаний, магнитных и электромагнитных полей, оптических спектров, явлений капиллярности и т.д.

Неразрушающий контроль в отличие от разрушающего обеспечивает проверку качества, надежности и безопасности объектов без разрушения, т.е. после него продукция может использоваться по прямому назначению и во многих случаях без остановки работы объекта.

Наиболее распространенным методом неразрушающего контроля является акустический, которым выполняют более 60 % всего объема неразрушающего контроля. Акустическим методом стало возможным обнаруживать не только макроскопические дефекты в металлах, но и определять их структуру, фазовое состояние, однородность зерна, межкристаллитную коррозию и т.п. Автоматизация процессов акустического контроля повысила его производительность и привела к повышению качества технологии производства.

Для обеспечения высококачественного контроля предприятия и фирмы выпускают современные приборы и установки, которые относятся к

высокотехнологичному оборудованию. При их разработке и эксплуатации требуются глубокие знания в области акустики, материаловедения, электроники, обработки информации, метрологического обеспечения и др. В свою очередь, это требует качественной подготовки специалистов, работающих в области акустического неразрушающего контроля.

Цель учебного пособия – познакомить читателя с основными понятиями, необходимыми для освоения методов возбуждения и приема упругих импульсов, методов контроля. Изучение работы дефектоскопа УД2-12, принципа действия, способов применения и технических характеристик позволит повысить уровень подготовки бакалавров, специалистов, магистров, аспирантов, инженеров и других специалистов.

Объектом исследований являются: дефектоскоп УД2-12, прямые и наклонные пьезоэлектрические преобразователи с различными углами ввода ультразвука, а также контрольные образцы СО-1, 2, 3 и образцы из стали и других материалов с внутренними дефектами и без дефектов.

## РАЗДЕЛ 1. ОСНОВНЫЕ ПОНЯТИЯ ОБ УЛЬТРАЗВУКЕ

Что такое ультразвук? *Звук с частотой, превышающей диапазон восприятия человеком (обычно 20 кГц), называется ультразвуком.* Тем не менее, в ультразвуковом неразрушающем контроле и толщинометрии используются звуковые волны в диапазоне от 100 кГц до 50 МГц. Принцип работы ультразвуковой и аудио волн одинаков, но ультразвуковая волна значительно короче. Это означает, что она может быть отражена от таких малых поверхностей, как дефекты внутри материала. Как раз это качество ультразвука позволяет его использовать для неразрушающего контроля. На рис. 1.1 акустический спектр условно разбивается на три диапазона частот. Ультразвуковой диапазон далее делится на 3 участка.

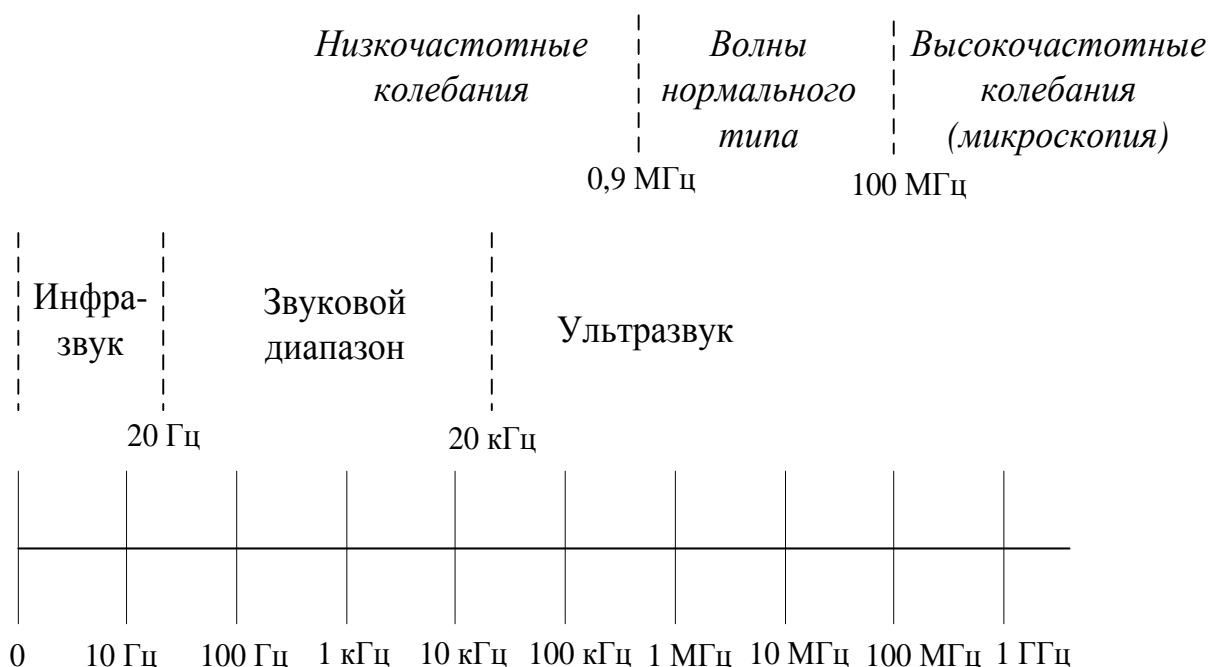


Рисунок 1.1 – Диапазон частот упругих колебаний

*Частота, период и длина волны.* Ультразвуковые колебания по форме схожи с распространением световых волн. В отличие от световой волны, которая может распространяться в вакууме, для распространения ультразвуковых волн требуется упругая среда в виде жидкости или твердого тела. То есть ультразвуковая волна, является механической. На рис. 1.2 отражены основные параметры незатухающей волны: длина  $\lambda$  и

полный цикл распространения волны  $T$ .

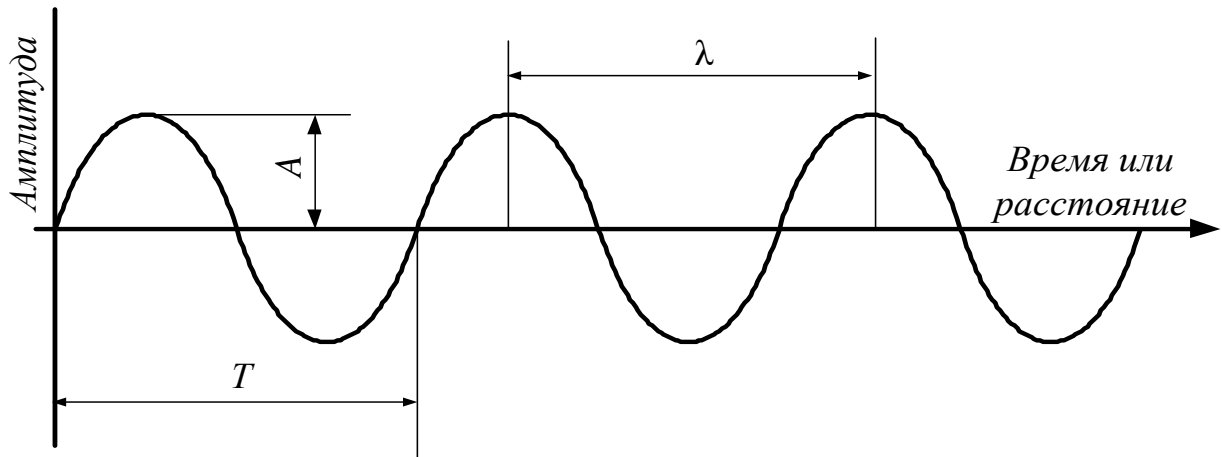


Рисунок 1.2 – Схематическое изображение незатухающей волны

Число циклов, завершенных за одну секунду, характеризуется частотой ( $f$ ) и измеряется в Герцах (Гц);

- 1 цикл/секунду = 1 Гц
- 1 000 циклов/секунду = 1 кГц
- 1 000 000 циклов/секунду = 1 МГц

Время, требующееся для завершения полного цикла – период ( $T$ ) – измеряется в секундах. Частота и период незатухающей волны связаны уравнением:

$$f = \frac{1}{T}. \quad (1.1)$$

*Скорость и длина ультразвуковой волны.* Скорость распространения звука в полностью упругом материале при одной температуре и давлении постоянна. Связь между  $c$ ,  $f$ ,  $\lambda$  и  $T$  имеет вид

$$\lambda = \frac{c}{f} = c \cdot T, \quad (1.2)$$

где  $\lambda$  – длина волны,  $c$  – скорость звука в материале,  $f$  – частота,  $T$  – период

колебаний частиц материала.

*Распространение волн и движение частиц.* В большинстве методов ультразвуковых исследований применяются продольные и поперечные волны. Существуют так же другие волновые формы, включая поверхностные волны и волны Лемба.

*Продольная волна* – это волна сжатия, в которой движение частиц происходит в одном направлении с распространением самой волны.

*Поперечная волна* – вид волнового движения, в котором частицы движутся поперечно к направлению распространения волны.

Движение частиц по отношению к распространению продольных и поперечных волн показано на рис. 1.3.

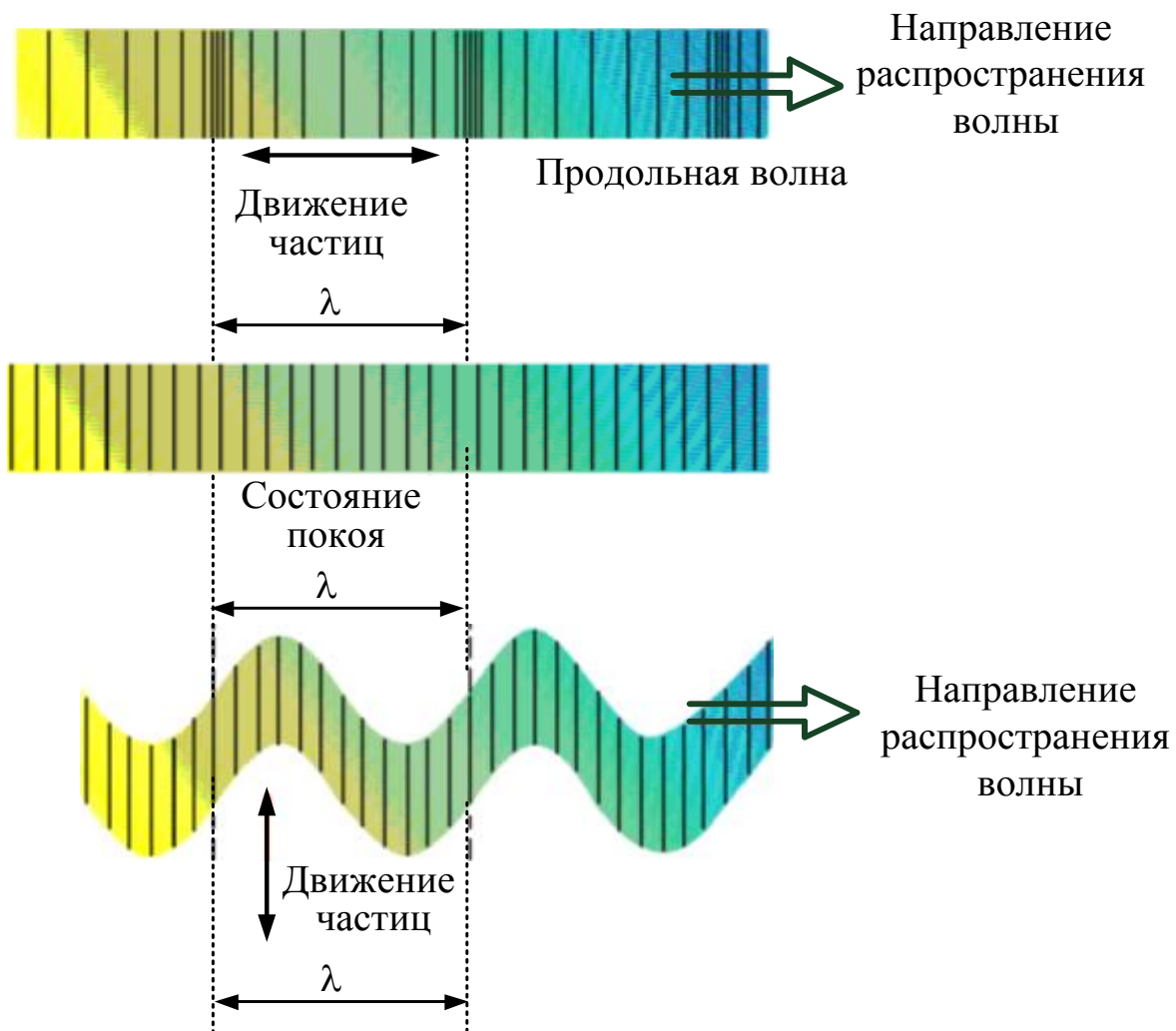


Рисунок 1.3 – Схематическое изображение продольных и поперечных ультразвуковых волн

*Поверхностные акустические волны* – упругие волны, распространяющиеся вдоль поверхности твёрдого тела или вдоль границы с другими средами.

*Применение ультразвука.* При проведении неразрушающего ультразвукового контроля используются высокочастотные звуковые волны, возбуждаемые в объекте контроля для получения информации об объекте без изменения или нанесения какого-либо повреждения.

### **Контрольные вопросы**

1. Какие основные параметры ультразвуковой волны?
2. Что такое длина волны?
3. Какой диапазон волн применяется в ультразвуковом контроле?
4. В чем разница между продольной и поперечной волнами?
5. Что такое поверхностные акустические волны?



## РАЗДЕЛ 2. ВОЗБУЖДЕНИЕ И ПРИЕМ УЛЬТРАЗВУКОВЫХ КОЛЕБАНИЙ

### 2.1. Понятие о пьезоэффекте

Для получения ультразвука названных выше частот (1-5 МГц) применяют пьезоэлектрические, магнитострикционные, электромагнитно-акустические и другие преобразователи. Наибольшее распространение получили пьезоэлектрические преобразователи (ПЭП), в которых активными являются пьезоэлементы, изготовленные из монокристалла кварца или пьезокерамических материалов – титаната бария, цирконат титаната свинца и др. Для изготовления преобразователей (вставок, резонаторов) чаще всего используют ПЭП из цирконаттитаната свинца марки 19 - ЦТС- 19.

*Пьезоэлектрический эффект* заключается в образовании в кристаллическом материале электрических зарядов при приложении к нему механических напряжений. Этот эффект наблюдается в природных кристаллах, таких как кварц (химическая формула  $\text{SiO}_2$ ), поляризованных керамических материалах и некоторых полимерах, например, в поливинилиденфториде.

Эта упрощенная модель показывает, как на поверхности кристаллического материал могут образовываться электрические заряды в ответ на приложенное механическое воздействие (рис. 2.1).

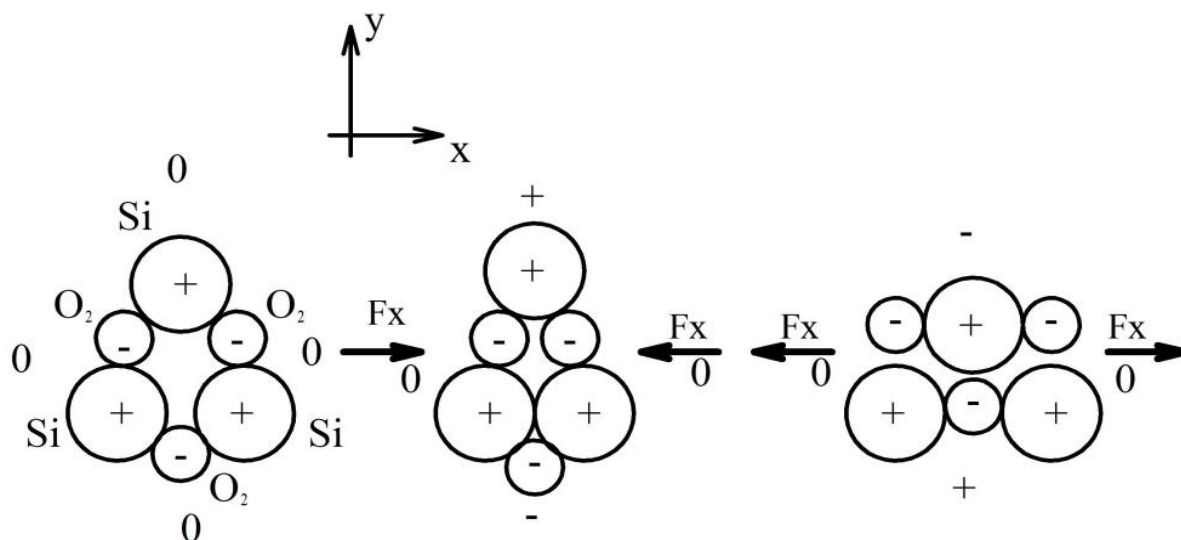


Рисунок 2.1 – Пьезоэлектрический эффект кварцевого кристалла

Для сбора электрических зарядов к кристаллу на противоположных сторонах от среза прикрепляют электроды (рис. 2.2).

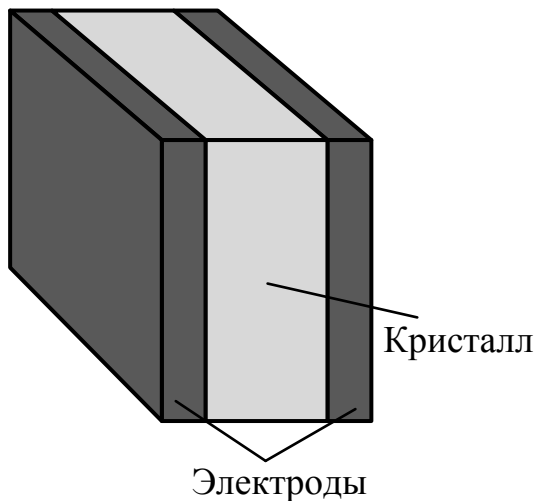


Рисунок 2.2 – Пьезоэлектрический датчик, сформированный при помощи электродов, нанесенных на поляризованный кристалл

Построенный таким образом пьезоэлектрический датчик можно считать конденсатором, в котором в качестве диэлектрика выступает сам кристалл, работающий как генератор электрических зарядов, приводящих к появлению электрического напряжения на электродах.

Пьезоэлектрический эффект является *обратимым физическим явлением*. Это означает, что приложенное к кристаллу электрическое напряжение приводит к появлению механической деформации. Если разместить на кристалле несколько электродов и на одну пару из них подать напряжение, на остальных парах электродов будет накапливаться заряд, сформированный из-за возникновения деформации. Такой прием достаточно широко применяется в разных типах пьезоэлектрических преобразователей.

*Пьезоэлектрические кристаллы являются прямыми преобразователями механической энергии в электрическую.*

Величина заряда, генерируемого на поверхности пьезоэлектрического кристалла, пропорциональна приложенной силе. В свою очередь, емкость  $C$  может быть представлена через площадь поверхности электрода  $a$  и толщину кристалла  $l$  (здесь учитывается площадь электродов, а не самого кристалла, поскольку пьезоиндуцированный заряд накапливается только на них)

$$C = k\epsilon_0 \frac{a}{l}, \quad (2.1)$$

где  $\epsilon_0$  – электрическая постоянная, а  $k$  – диэлектрическая проницаемость.

На плоские поверхности пьезоэлементов наносят тонкие слои серебра, служащие электродами. При подведении к электродам

знакопеременного электрического напряжения пьезоэлемент совершает вынужденные механические колебания (растягивается и сжимается, как это показано на рис. 2.3) с частотой подаваемого электрического напряжения. Данное явление называется *обратным пьезоэффектом*.

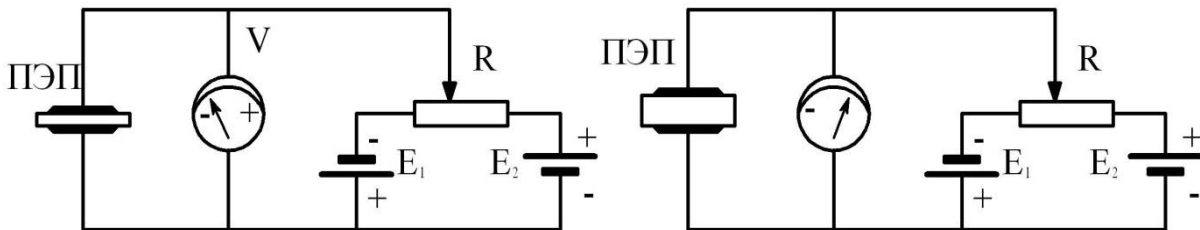


Рисунок 2.3 – Иллюстрация обратного пьезоэффекта

При воздействии на пьезоэлемент упругих механических колебаний на его электродах возникает знакопеременное электрическое напряжение, величина которого пропорциональна прилагаемому к пьезоэлементу усилию (рис. 2.4). Это явление носит название *прямой пьезоэффект*.

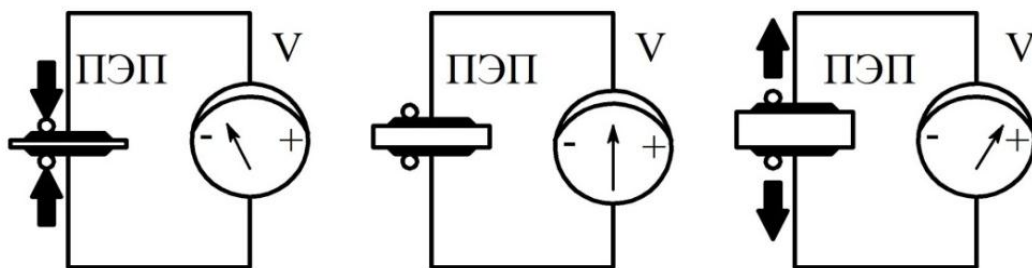


Рисунок 2.4 – Иллюстрация прямого пьезоэффекта

*Понятие о резонансе.* Амплитуда колебаний пьезоэлемента зависит от напряжения на электродах и соотношения частоты подаваемого на него переменного напряжения и собственной частоты колебаний элемента. На рис. 2.5, а показана реакция пьезоэлемента на возмущающее воздействие низкой частоты, а на рис. 2.5, б – реакция этого же пьезоэлемента на воздействие высокой частоты. Из рисунков видно, что амплитуда колебаний пьезоэлемента при воздействии высокой частоты выше, чем низкой. Однако при дальнейшем увеличении частоты возбуждающего воздействия амплитуда колебаний пьезоэлемента снова начнет уменьшаться.

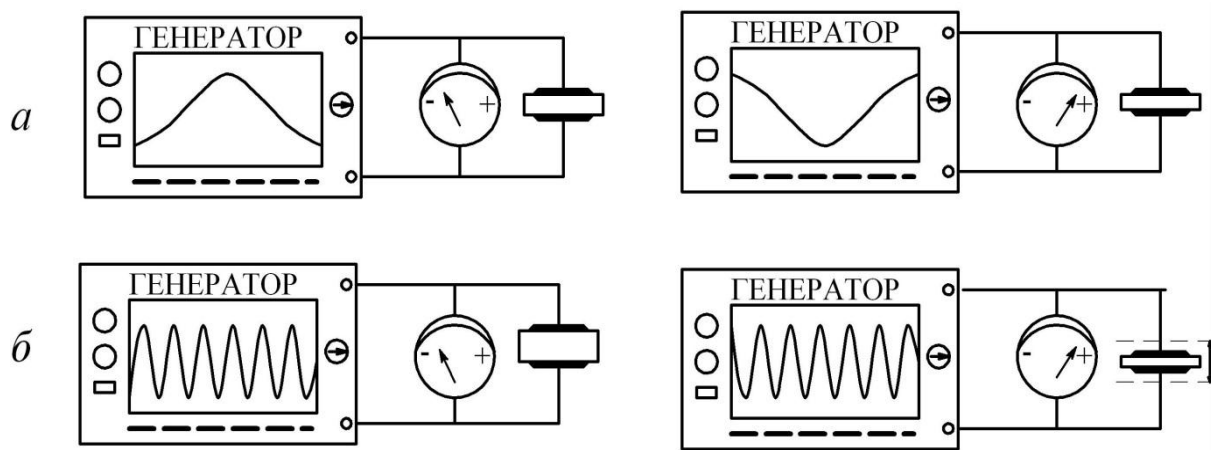


Рисунок 2.5 – К понятию о резонансе

Наибольшая амплитуда колебаний пьезоэлемента достигается при резонансе, то есть когда собственная частота его колебаний совпадает с частотой возбуждающего переменного напряжения. Собственная частота  $f$  элемента зависит от его толщины  $b$  и скорости упругих волн  $c$ :

$$f = \frac{c}{2b}. \quad (2.2)$$

Чем ниже требуемая частота генерируемых ультразвуковых колебаний, тем больше толщина резонансной пьезопластины. На рис. 2.6 показаны осциллограммы напряжений (прямой пьезоэффект), снимаемых с пьезопластин различной толщины (**0,3 мм, 0,7 мм и 1,3 мм**), при воздействии на них знакопеременного давления одинаковой величины, но различной частоты (**650 кГц, 1,25 МГц, 2,5 МГц, 5 МГц и 10 МГц**).

Как видно из рис. 2.6, резонансная частота зависит от толщины пьезопластины. Так у пьезопластины толщиной **0,3 мм** максимальная амплитуда получается при частоте воздействия на нее **5 МГц**, у пьезопластины толщиной **0,7 мм** – при частоте **2,5 МГц**, а у пьезопластины толщиной **1,3 мм** – при частоте **1,25 МГц**.

На рис. 2.7 показаны колебания пьезопластин той же толщины, что и на рис. 2.6, при подаче на них переменного напряжения одинаковой амплитуды, но различной частоты (обратный пьезоэффект).

Сопоставление рис. 2.6 и рис. 2.7 позволяет сделать вывод о том, что как при *прямом*, так и при *обратном* пьезоэффектах резонансные частоты пьезопластин *совпадают и определяются их толщиной*.

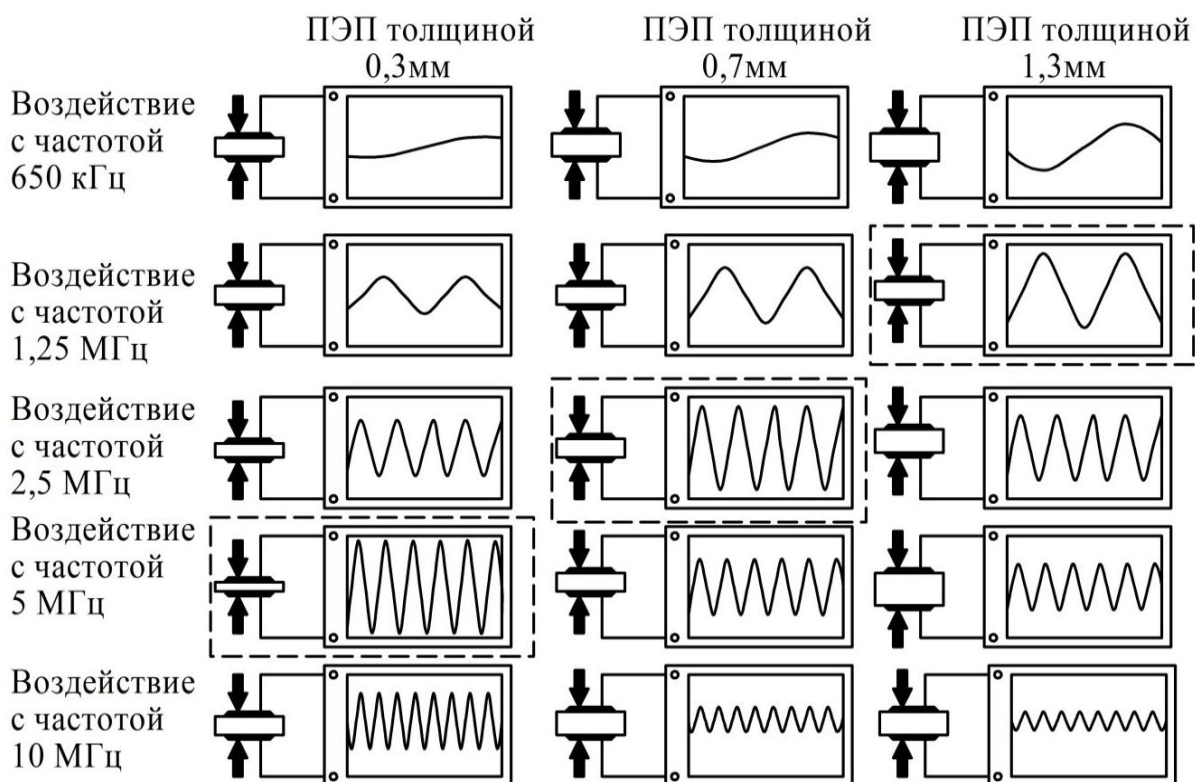


Рисунок 2.6 – Зависимость резонансной частоты ПЭП от его толщины при прямом пьезоэффекте (случай резонанса выделен фоном)

Как видно из приведенных рисунков, вынужденные колебания пьезоэлемента можно возбудить на любой частоте. В этом случае излучаемая энергия будет меньше, чем на резонансной частоте. Зависимость амплитуды возбуждаемых пьезоэлементом колебаний от частоты, подаваемого на него переменного напряжения постоянной амплитуды, называется его *амплитудно-частотной характеристикой АЧХ*. На рис. 2.8 представлены АЧХ дисковых пьезоэлементов толщинами 1,3 мм, 0,7 мм и 0,3 мм.

Основными характеристиками пьезоэлементов являются частотный спектр, излучаемая мощность звука, направленность излучения. При одночастотном излучении основными характеристиками пьезоэлементов являются рабочая частота и частотная полоса. Для **резонансных**

**пьезоэлементов**, применяемых в рельсовых дефектоскопах, рабочей частотой является *собственная* частота, а ширина частотной полосы определяется ее **добротностью**.

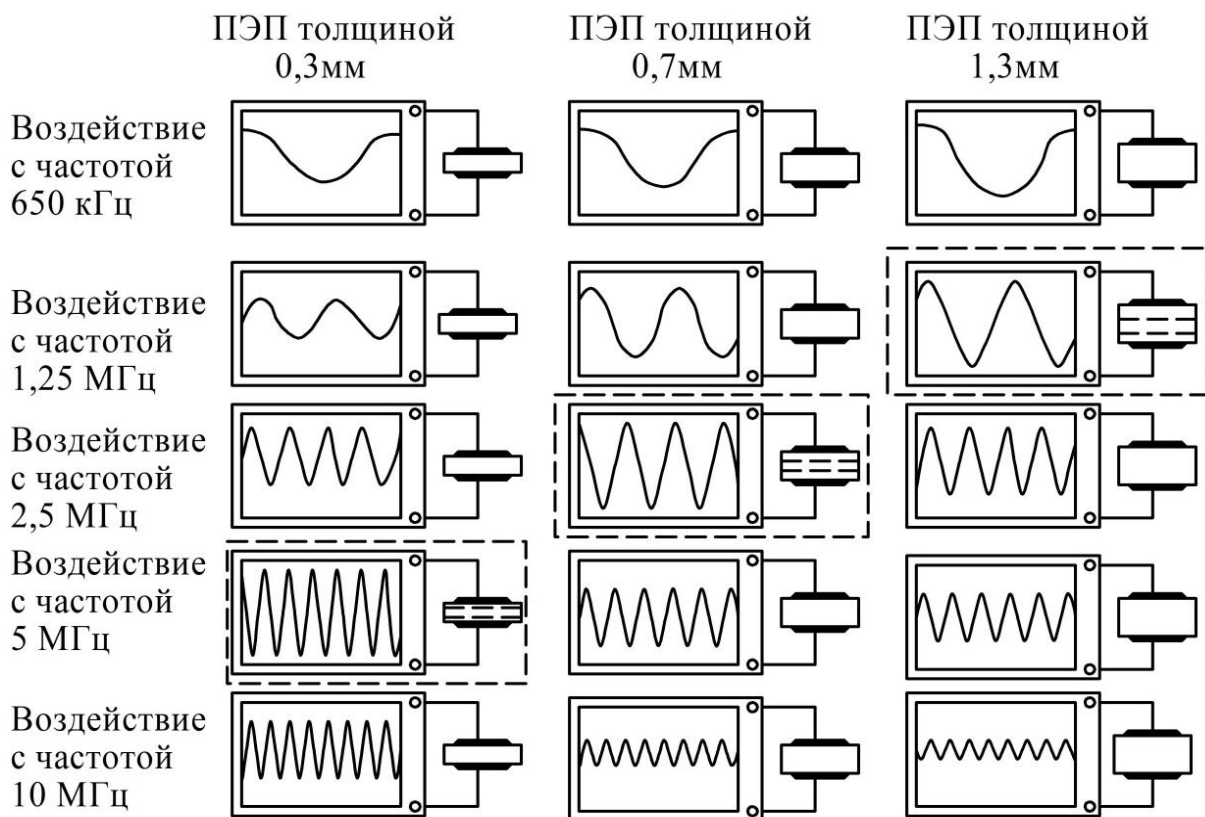


Рисунок 2.7 – Зависимость резонансной частоты ПЭП от его толщины при обратном пьезоэффекте (случай резонанса выделен фоном)

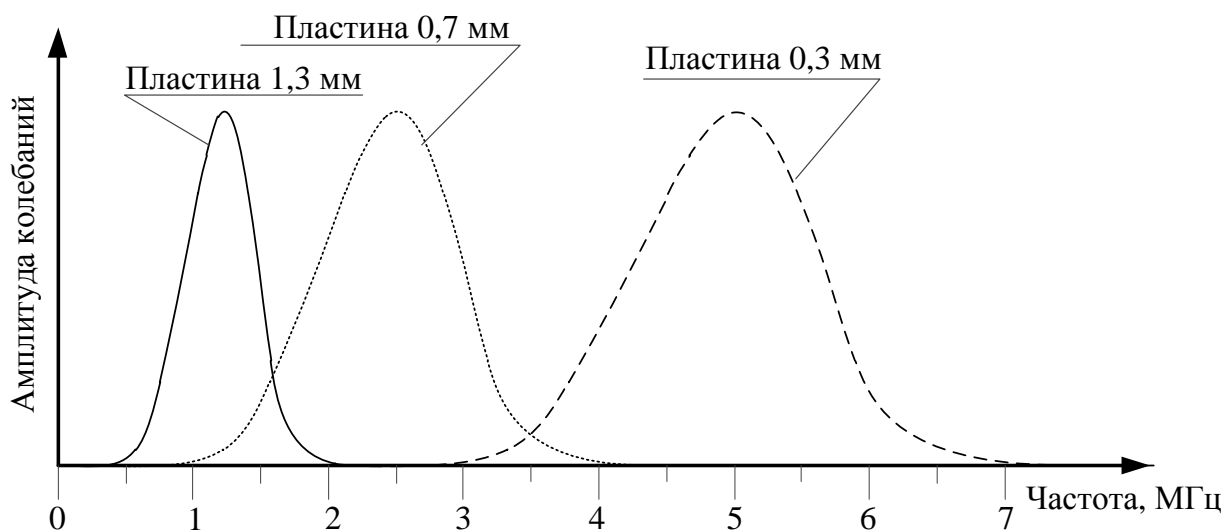


Рисунок 2.8 – Амплитудно-частотная характеристика пьезопластин различной толщины

## 2.2. Понятие о добротности

*Добротность* – количественная характеристика резонансных свойств пьезоэлемента, показывающая, во сколько раз амплитуда вынужденных колебаний при резонансе превышает амплитуду вынужденных колебаний на частоте, намного ниже резонансной, при одинаковой амплитуде вынуждающей силы. Короткое импульсное воздействие на пьезоэлемент

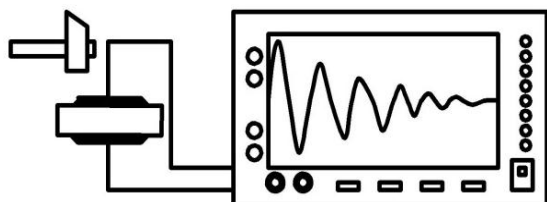


Рисунок 2.9 – Иллюстрация процесса ударного возбуждения пьезопреобразователя

приводит к появлению на его обкладках серии затухающих по экспоненте гармонических колебаний на собственной частоте пьезоэлемента, что иллюстрирует рис. 2.9. Причем количество периодов этих затухающих колебаний численно равно добротности

пьезоэлемента. Пьезоэлементы, используемые в ультразвуковой дефектоскопии, имеют обычно низкую добротность (в пределах от 1 до 10).

## 2.3. Понятие о направленности

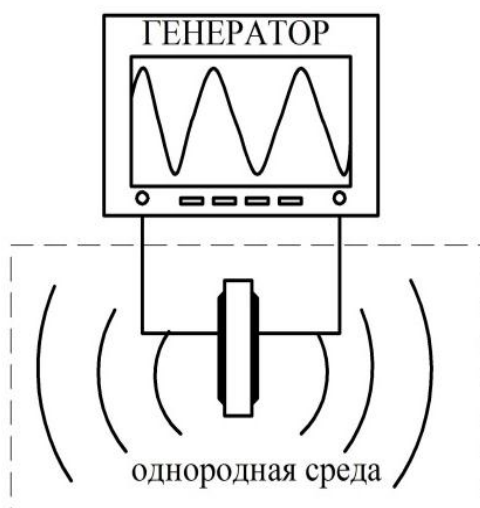


Рисунок 2.10 – Процесс излучения ультразвуковых колебаний

Подача на пьезоэлектрический преобразователь переменного напряжения приводит (вследствие обратного пьезоэффекта) к механическим его колебаниям (растяжению и сжатию). Эти механические колебания пьезоэлемента передаются в окружающую среду, возбуждая в ней акустические (ультразвуковые) колебания. Возбуждаемые пьезоэлементом ультразвуковые колебания (рис. 2.10) распространяются в среде в различных направлениях. Причем интенсивность распространения этих колебаний в

различных направлениях различна.

*Направленность* излучения преобразователя – это способность его

излучать звуковые волны в одних направлениях в большей степени, чем в других. Направленность преобразователя описывают характеристикой направленности – отношением интенсивности, создаваемой данным излучателем в направлении максимального излучения, к интенсивности ненаправленного излучателя той же мощности на том же расстоянии. Характеристику направленности представляют обычно в полярной системе координат и называют *диаграммой направленности*.

Колеблющийся пьезоэлектрический преобразователь при достаточно больших размерах его в сравнении с длиной ультразвуковой волны ( $D > \lambda$ ) создает в окружающей среде волновое поле, имеющее вблизи от излучателя приблизительно цилиндрическую форму (ближняя зона, зона дифракции Френеля). Начиная с некоторого расстояния  $Z_0$ , поле приобретает форму усеченного конуса с небольшим углом  $\varphi_r$  при вершине (дальняя зона, зона дифракции Фраунгофера), рис. 2.11.

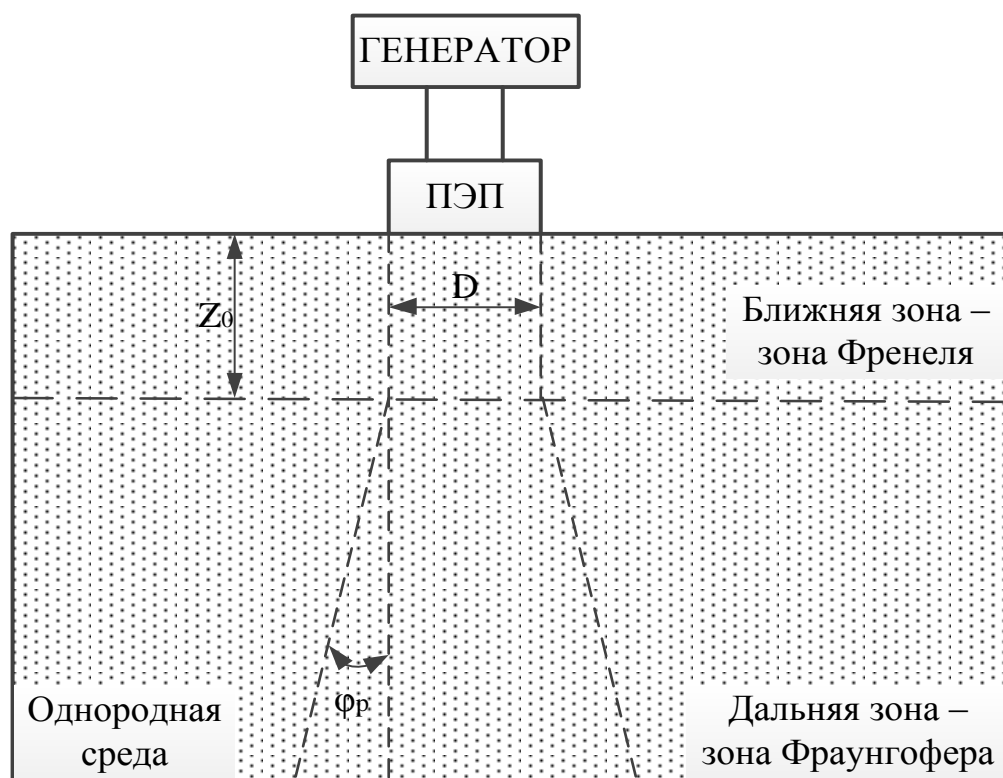


Рисунок 2.11 – Зоны излучения ПЭП

Таким образом, излучаемые пьезопластиной волны распространяются узким, слегка расходящимся пучком. Величина угла  $\varphi_r$ , под которым этот пучок расходится, сравнительно невелика и зависит от соотношения между геометрическими размерами (площадью излучающей поверхности)



пьезоэлемента и длиной волны излучаемых ультразвуковых колебаний. Для излучателя, имеющего форму диска диаметром  $D$ , величина угла  $\varphi_p$  (определяющего ширину диаграммы направленности излучателя) оценивается выражением

$$\varphi_p = \arcsin\left(\frac{1,22\lambda}{D}\right). \quad (2.3)$$

Из приведенного выражения следует, что при постоянной частоте  $f$  излучения ультразвуковых колебаний чем больше диаметр пьезопластины, тем уже диаграмма направленности. На рис. 2.12 показан процесс формирования диаграммы направленности при различных геометрических размерах пьезоэлемента.

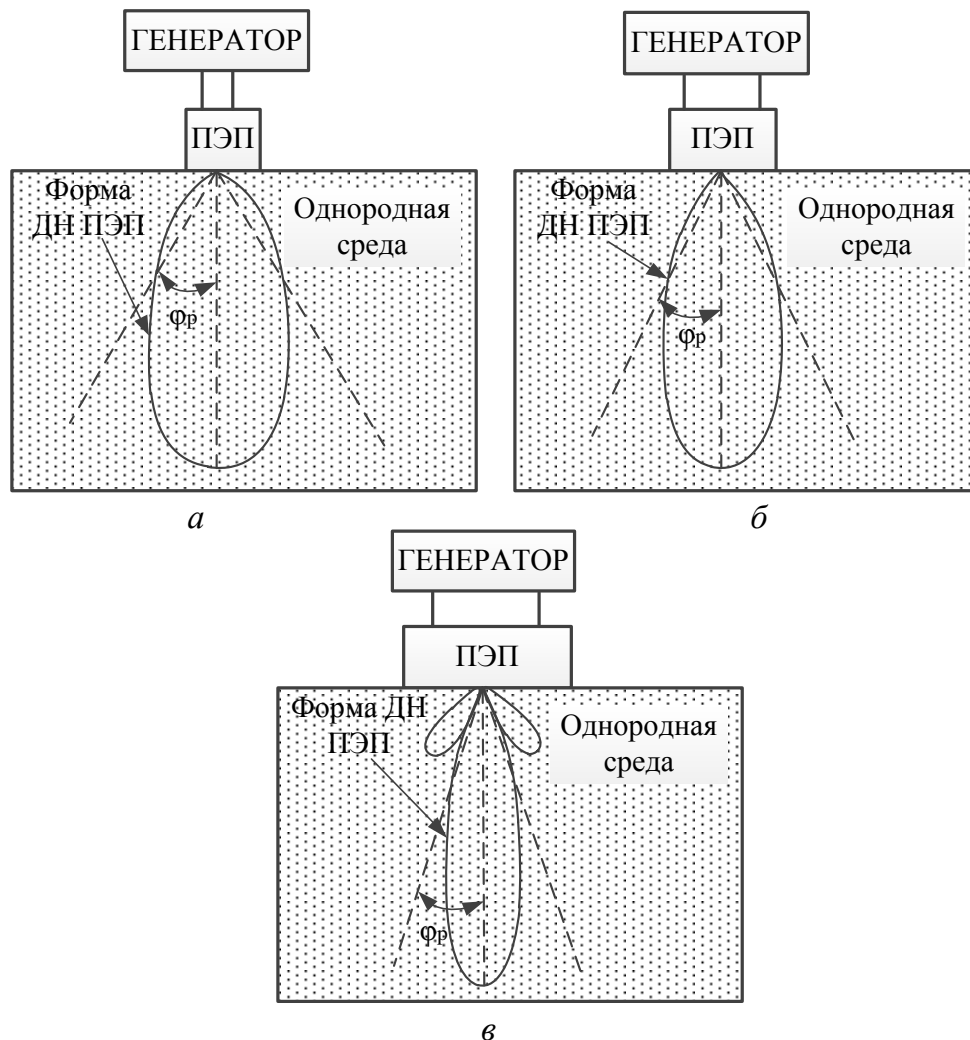


Рисунок 2.12 – Влияние размера ПЭП на вид и ширину его диаграммы направленности (ДН):

*a* – широкая; *б* – средняя; *в* – узкая с боковыми лепестками

Как видно из рис. 2.12 в, при больших размерах пьезоэлемента диаграмма направленности становится достаточно узкой и, кроме того, у нее появляются боковые лепестки. Если преобразователь используется для приема ультразвуковых колебаний, он также имеет определенную направленность по чувствительности. Диаграммы направленности преобразователя в режимах излучения и приема совпадают.

Протяженность ближней зоны  $Z$  для излучателя, имеющего форму диска, пропорциональна квадрату его диаметра и обратно пропорциональна длине волны ультразвуковых колебаний. Для ПЭП, используемых в резонаторах рельсовых дефектоскопов,  $Z_0$  равна примерно **15 мм**. В ближней зоне амплитуда ультразвукового поля как вдоль оси пучка, так и по его сечению претерпевает осцилляцию.

### **Контрольные вопросы**

1. В чем разница между прямым и обратным пьезоэлектрическим эффектом?
2. Какая зависимость резонансной частоты ПЭП от его толщины при прямом и обратном пьезоэффекте?
3. Из чего состоит пьезоэлектрический датчик?
4. Что такое добротность?
5. Что такое направленность излучения преобразователя?
6. Какие бывают зоны излучения ПЭП?
7. Какое влияние оказывает размер ПЭП на вид и ширину его диаграммы направленности?
8. Чему пропорциональна протяженность ближней зоны  $Z$  для излучателя, имеющего форму диска?

## РАЗДЕЛ 3. СВОЙСТВА УЛЬТРАЗВУКОВЫХ КОЛЕБАНИЙ

### 3.1. Затухание ультразвуковых колебаний

Как отмечалось в разд. 2.3, направленность пьезоэлектрических преобразователей достаточно высока (в практике контроля угол раскрытия  $\varphi_p$  диаграммы направленности не превышает **10-14°**). По мере удаления от излучателя амплитуда колебаний частиц постепенно убывает. Это обусловлено геометрическим расхождением лучей, что приводит к увеличению ширины ультразвукового пучка, а также потерями в среде (в металле), приводящими к постепенному затуханию колебаний при их распространении. На рис. 3.1 показан характер изменения затухания ультразвуковых колебаний при увеличении расстояния между излучателем и приемником.

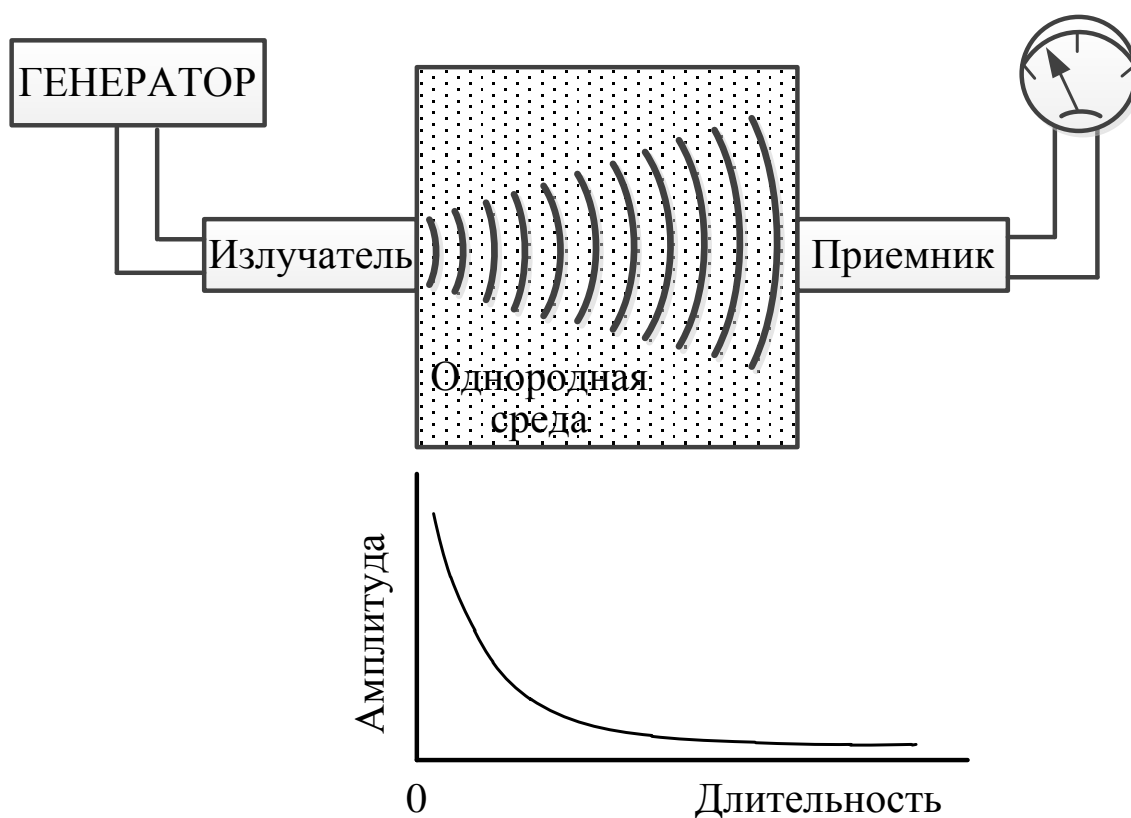


Рисунок 3.1 – Зависимость затухания ультразвуковых колебаний от расстояния

*Затухание* ультразвуковых колебаний происходит по экспоненциальному закону:

$$A = A_0 \cdot \exp(-\delta \cdot r), \quad (3.1)$$

где  $r$  – расстояние, пройденное волной, м;  $\delta$  – коэффициент затухания, 1/м. Коэффициент затухания определяется выражением:

$$\delta = \delta_{\text{п}} + \delta_{\text{р}}, \quad (3.2)$$

т. е. складывается из коэффициентов поглощения  $\delta_{\text{п}}$  и рассеяния  $\delta_{\text{р}}$ .

При поглощении звуковая энергия превращается в тепловую. При рассеянии на кристаллах звуковая энергия уходит в стороны от направления распространения волны (рис. 3.2).

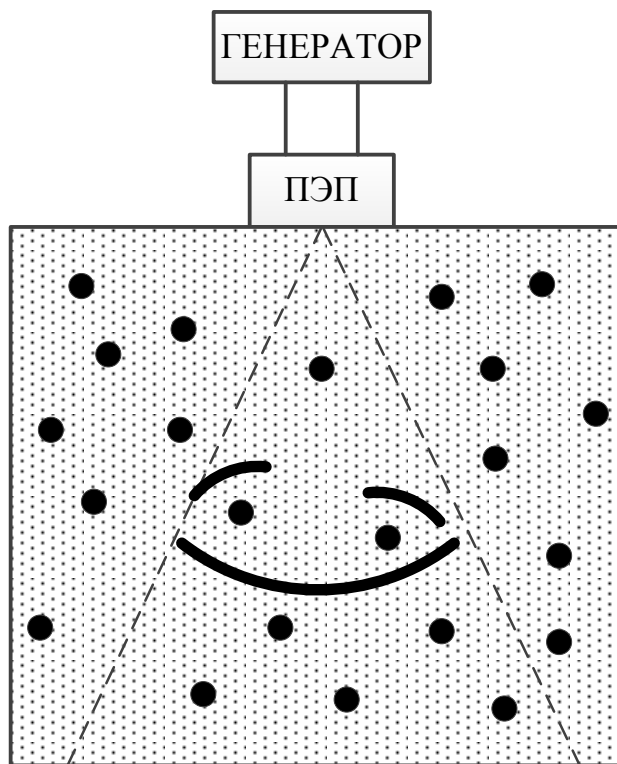


Рисунок 3.2 – Процесс рассеяния ультразвуковых колебаний на кристаллах среды распространения

Затухание ультразвука в воздухе очень велико. В воде оно в тысячи раз меньше. В пластмассах затухание также велико и определяется в основном поглощением. В стали затухание небольшое, и ультразвуковые колебания с частотой **2,5 МГц** могут в ней распространяться на расстояние до **10 м**.

Для различных материалов коэффициент затухания для продольной волны на частоте **2,5 МГц** представлен в таблице 3.1.

Таблица 3.1 – Затухание ультразвука в различных материалах

Материал	Затухание $\delta$ , (1/м)
Вода	0,0004
Алюминий	0,01-5
Сталь (Ст 20)	1-8
Органическое стекло (плексиглас)	58
Воздух	280

Величина, обратная коэффициенту затухания, показывает, на каком пути амплитуда волны уменьшается в **e** раз (**e = 2,73** – число Непера). Поэтому размерность затухания – **1/м**. Иногда используют внесистемную единицу **непер на метр (Нп / м)**. Часто коэффициент затухания выражают числом **N** отрицательных децибелов, на которое уменьшается амплитуда волны на единичном участке пути

$$\frac{1}{\text{м}} = \frac{1 \cdot \text{Нп}}{\text{м}} = 8,686 \cdot \frac{\text{дБ}}{\text{м}}.$$

Коэффициент затухания ультразвуковых колебаний зависит от их частоты. Зависимость коэффициента затухания ультразвуковых колебаний в стали от частоты приведена на рис. 3.3.

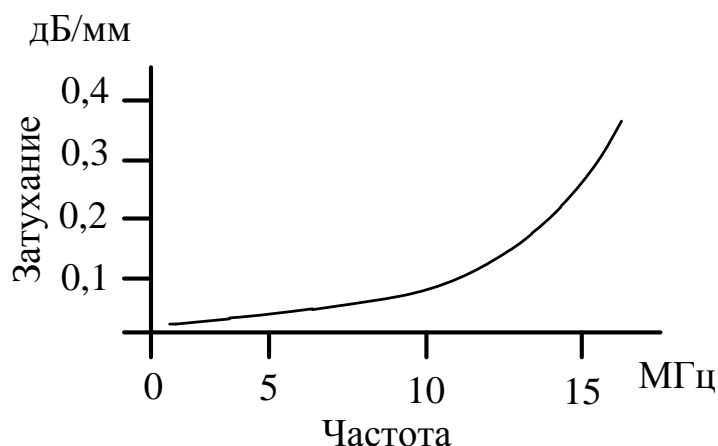


Рисунок 3.3 – Зависимость коэффициента затухания ультразвуковых колебаний в стали от частоты

### 3.2. Отражение ультразвуковых колебаний (при нормальном падении волн)

Если на пути распространения ультразвуковой волны встречается другая среда (среда с другими акустическими свойствами), то одна часть энергии проходит во вторую среду, а другая часть – отражается в первую (рис. 3.4). Распределение энергии между отраженной и прошедшей волнами определяется соотношением их акустических свойств (удельных акустических сопротивлений сред).

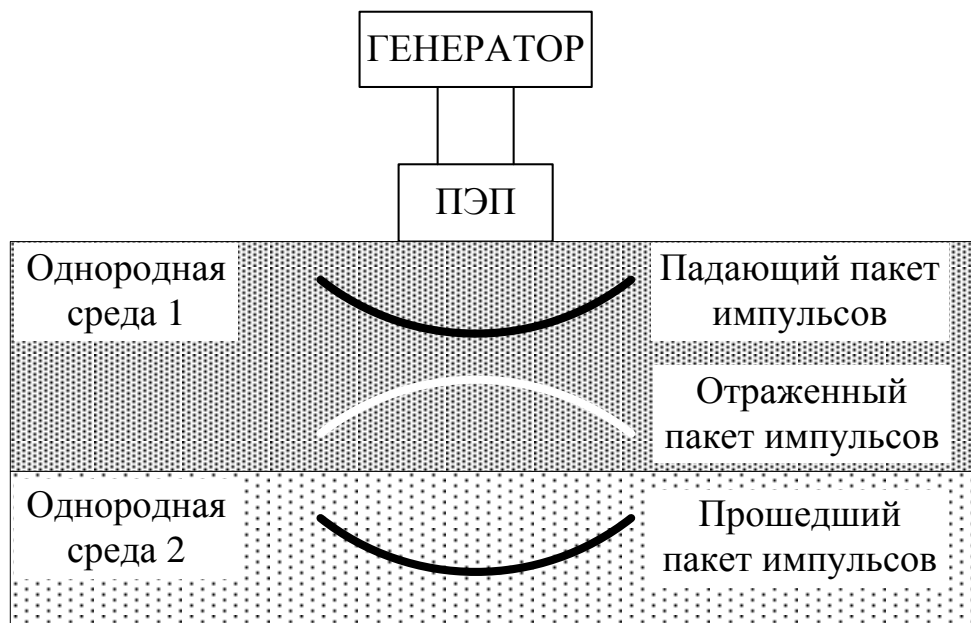


Рисунок 3.4 – Падающая, прошедшая и отраженная волны

Коэффициент отражения  $R$  – отношение интенсивностей отраженной и падающей волн

$$R = \frac{J_{\text{отр.}}}{J_{\text{пад}}}. \quad (3.3)$$

Коэффициент прохождения  $D = 1 - R$  – отношение интенсивностей прошедшей и падающей волн

$$D = \frac{J_{\text{прош.}}}{J_{\text{пад}}}. \quad (3.4)$$

На отражении упругих волн от несплошностей основана выявляемость дефектов при эхо-дефектоскопии, так как по своим акустическим свойствам несплошности (трещины, поры, шлаковые включения и др.) отличаются от основного материала.

Коэффициент отражения от трещин и пор близок к единице, если величина раскрытия больше 0,0001 мм. Коэффициент отражения по амплитуде от шлаковых включений составляет 0,15-0,50.

### **3.3. Преломление и трансформация ультразвуковых колебаний (при наклонном падении волн)**

При наклонном падении продольной волны из твердой среды 1 в твердую среду 2 на границе этих двух сред происходит:

- **отражение;**
- **преломление;**
- **трансформация (расщепление) волны** (рис. 3.5).

Если продольная упругая волна  $l$  со скоростью  $c_l$  падает на границу раздела двух твердых сред под углом, отличным от прямого, то отраженная и прошедшая волны преломляются и трансформируются на продольные  $l_1$ ,  $l_2$  и сдвиговые  $t_1$ ,  $t_2$  волны, распространяющиеся в первой и второй средах под различными углами со скоростями  $c_{l1}$ ,  $c_{l2}$ ,  $c_{t1}$ ,  $c_{t2}$  соответственно (на рис. 3.5 для простоты показан всего один луч из пучка лучей). На практике для обеспечения падения продольных волн под углом между пьезоэлементом и контролируемой деталью располагают призму из органического стекла или другого материала.

При этом угол  $\beta$  между падающим лучом  $c_l$  и перпендикуляром  $MN$  к поверхности раздела в точке  $O$  называется **углом падения**; углы  $\beta_t$  и  $\beta_l$  – **углами отражения**; углы  $\alpha_t$  и  $\alpha_l$  – **углами преломления** (или **углами ввода** соответственно продольной и сдвиговой волн).

Законы отражения и преломления упругих волн по аналогии с законами геометрической оптики формулируются так:

- *отраженные и преломленные лучи лежат в одной плоскости с падающим лучом и нормалью к поверхности раздела сред, проведенной в точке падения;*
- *угол отражения продольной волны равен углу падения;*

• углы падения, отражения и преломления связаны соотношением, называемым **законом Снелиуса**.

$$\frac{(\sin \beta)}{c_l} = \frac{(\sin \alpha_t)}{c_{l2}} = \frac{(\sin \beta_t)}{c_{t1}} = \frac{(\sin \beta_l)}{c_{l1}} = \frac{(\sin \alpha_l)}{c_{l2}}, \quad (3.5)$$

где  $c_{l1}$ ,  $c_{l2}$ ,  $c_{t1}$ ,  $c_{t2}$  – скорости распространения продольных и сдвиговых волн в 1-й и 2-й средах соответственно.

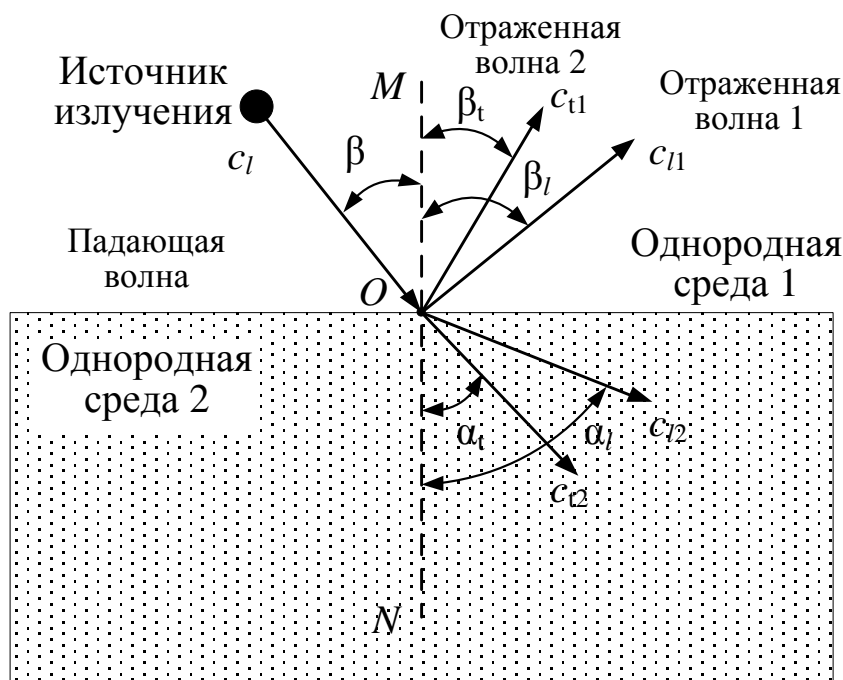


Рисунок 3.5 – Отражение и преломление ультразвуковых волн

При увеличении угла падения  $\beta$  продольной волны  $l$  углы  $\alpha_t$  и  $\alpha_l$  также увеличиваются (рис. 3.6) и при некотором значении  $\beta = \beta_{кр1}$  (первый критический угол), при котором продольные волны «выйдут» на поверхность среды 2 и «приплюснутся» к ранее возникшим поверхностным волнам. В среде при этом распространяются сдвиговые волны, попеременно отражаясь от граничных поверхностей. При  $\beta_{кр2}$  втором критическом угле в среде в направлении излучения распространяются преимущественно поверхностные волны.

Для лучей упругих волн в полной мере справедлив закон обратимости: если луч падает из среды 1 на границу со средой 2 под углом  $\beta$ , преломляется и входит в среду 2 под углом  $\alpha_l$ , то луч, падающий из среды



2 на границу с первой под углом  $\alpha_i$ , после преломления войдет в среду 1 под углом  $\beta$ .

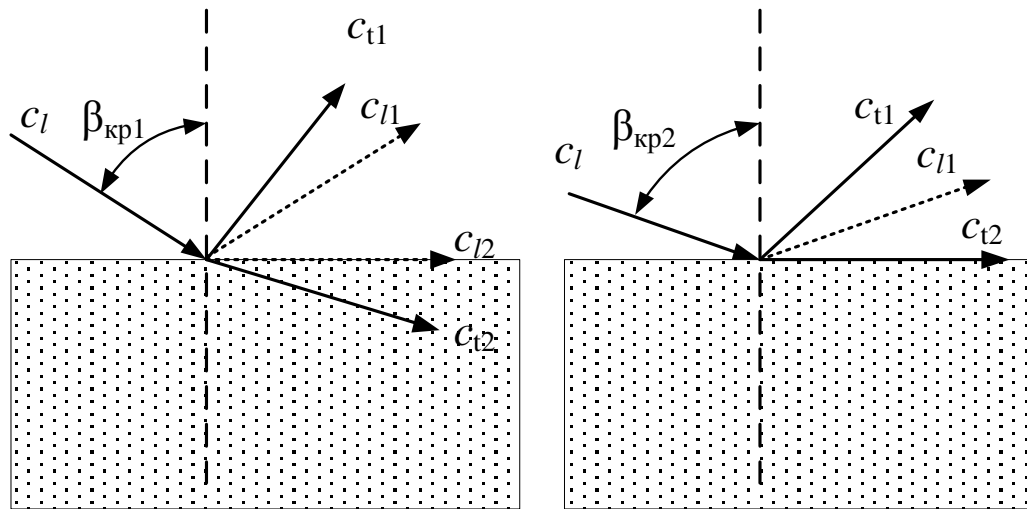


Рисунок 3.6 – Иллюстрация критических углов

Свойства упругих волн используют при конструировании наклонных преобразователей для контроля изделий сдвиговыми и продольными волнами. В таких преобразователях ультразвуковые колебания преломляются с помощью клинообразной призмы, изготовленной из органического стекла (или из другого материала) и выполняющей функцию среды 1, а средой 2 является контролируемое изделие.

При углах падения меньших, чем второй критический угол  $\beta_{кр2}$ , и больших, чем первый  $\beta_{кр1}$ , во второй среде возникает лишь поперечная волна со скоростью  $c$ . Для системы оргстекло – сталь расчетные критические углы составляют:

- первый критический угол  $\beta_{кр1} \sim 27^\circ$ ;
- второй критический угол  $\beta_{кр2} \sim 56^\circ$ .

Отмеченное свойство имеет большое практическое значение. В частности, если пьезопластину разместить на призме из органического стекла с углом  $\beta$  в пределах  $30\text{--}55^\circ$ , то в стальном изделии будет распространяться только поперечная волна. Все типовые наклонные преобразователи, используемые для контроля, имеют углы призмы в интервале между первым и вторым критическими углами ( $30^\circ$ ;  $40^\circ$ ;  $45^\circ$  и  $50^\circ$ ) и излучают в сталь поперечную волну. При контроле других материалов угол ввода будет иным.

Зная скорость распространения ультразвуковых колебаний в призме

и контролируемом изделии, можно рассчитать значения углов распространения продольных и поперечных волн в среде 2 в зависимости от угла  $\beta$  по формуле

$$\frac{(\sin \beta)}{c_{l1}} = \frac{(\sin \alpha)}{c_{t2}},$$

откуда

$$\sin \alpha = \frac{(c_{t2} \cdot \sin \beta)}{c_{l1}}.$$

Все сказанное выше относилось к отражению по законам геометрической оптики, справедливым для гладких поверхностей раздела. При отражении от шероховатых поверхностей, имеющих неровности высотой более  $(0,05-0,1)\lambda$ , происходит диффузное отражение, сопровождающееся рассеянием части энергии в разные стороны.

*На принципе отражений ультразвуковых волн от неоднородностей металла и основана выявляемость дефектов ультразвуковым эхо методом, так как трещины, включения и другие несплошности отличаются по своему акустическому сопротивлению от основного металла.*

Наилучшей выявляемостью обладают несплошности, не заполненные твердым веществом, например, раковины, расслоения и трещины с раскрытием до **0,0001–0,000001 мм**, так как коэффициент отражения от границы металла с любой газовой средой близок к единице. Шлаковые включения имеют коэффициент отражения около **0,15** для продольных волн и **0,35–0,65** – для сдвиговых, поэтому выявляются значительно хуже.

### **Контрольные вопросы**

1. По какому закону происходит затухание ультразвуковых колебаний?
2. Чем определяется коэффициент затухания, от чего он зависит?
3. Дайте определение коэффициентам отражения и прохождения.
4. Как происходит отражение и преломление ультразвуковых волн?
5. Дайте определение закону Снелиуса.
6. Что такое критические углы?

## РАЗДЕЛ 4. ИМПУЛЬСНЫЙ РЕЖИМ ИЗЛУЧЕНИЯ УЛЬТРАЗВУКОВЫХ КОЛЕБАНИЙ

Первый ультразвуковой дефектоскоп, разработанный С. Я. Соколовым в 1928 году, работал в непрерывном режиме излучения упругих колебаний. При этом он мог реализовать только теневой метод ультразвукового контроля, идея которого поясняется рис. 4.1.

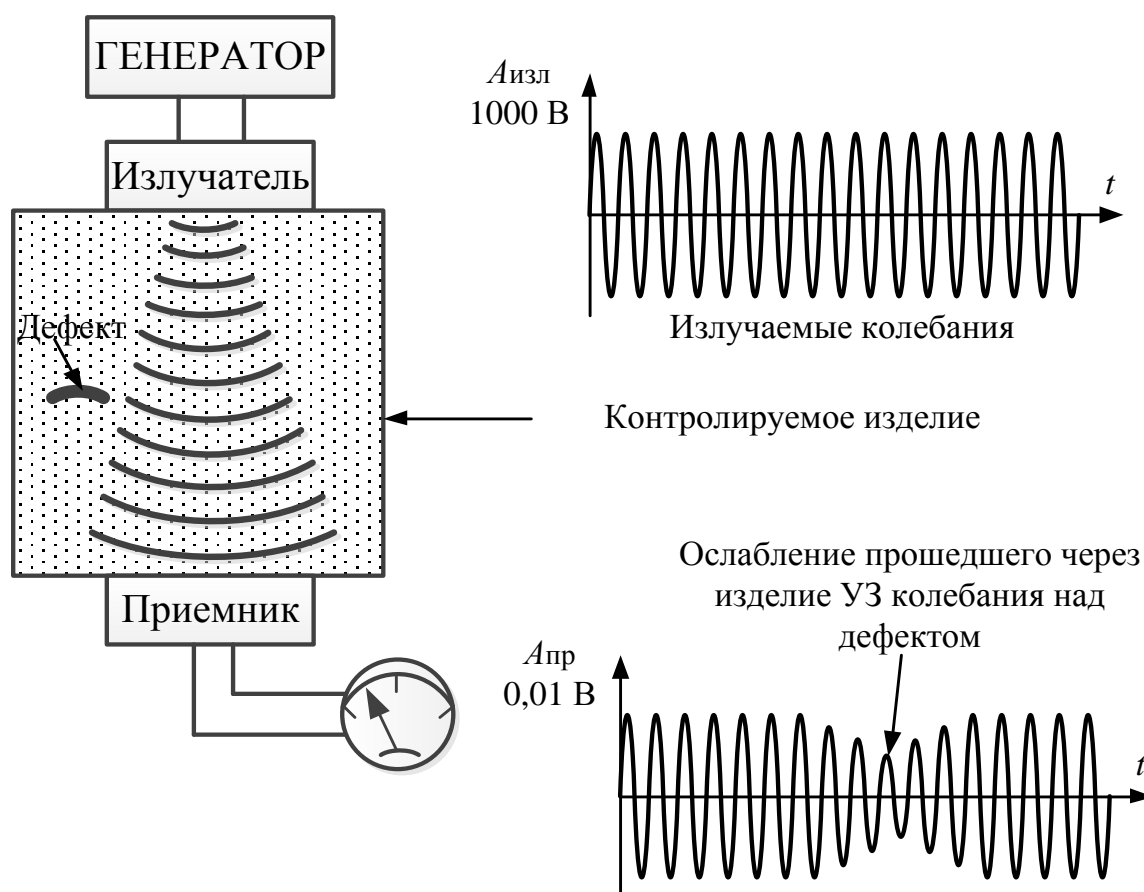


Рисунок 4.1 – Принцип теневого метода ультразвукового контроля изделий, реализованного С. Я. Соколовым

В современных дефектоскопах в основном используют импульсный режим излучения ультразвуковых колебаний. При этом периодически излучают кратковременные импульсы с высокочастотным (ВЧ) заполнением. Импульсы ультразвуковых колебаний, излучаемые в контролируемое изделие, называются **зондирующими**. Основные параметры излучаемых зондирующих импульсных колебаний показаны на рис. 4.2.

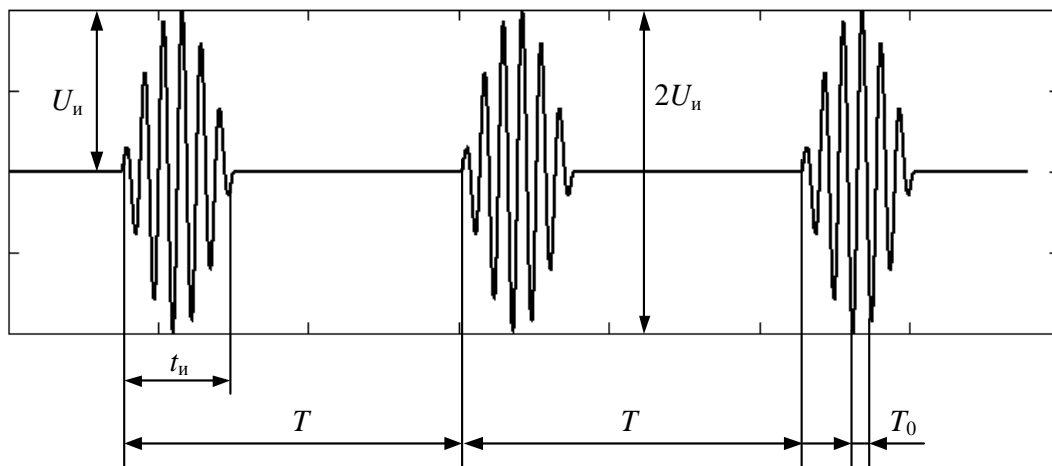


Рисунок 4.2 – Параметры излучаемых зондирующих импульсных колебаний

Здесь:

**$T$  – период следования** зондирующих импульсов (интервал времени между двумя посылками зондирующих импульсов), измеряется в **мс** или в **мкс**;

**$F$  – частота следования** посылок зондирующих импульсов (величина, обратная периоду следования), измеряется в **Гц** или в **кГц**:

$$F = \frac{1}{T}; \quad (4.1)$$

**$t_{\text{и}}$  – длительность** зондирующего импульса, измеряется в **мкс**;

**$T_0$  – период высокочастотного заполнения** зондирующего импульса, измеряется в **мкс**;

**$f_0$  – частота высокочастотного заполнения** зондирующего импульса (величина, обратная периоду ВЧ заполнения), измеряется в **МГц**:

$$f_0 = \frac{1}{T}; \quad (4.2)$$

$U_{\text{и}}$  – амплитуда зондирующего импульса, измеряется в **В**.

*Частота следования зондирующих импульсов*, используемая в различных дефектоскопических средствах, зависит от скорости перемещения ультразвукового преобразователя по контролируемому изделию чем быстрее перемещаются ультразвуковые преобразователи по контролируемому изделию, тем чаще должны посылаться ультразвуковые

колебания.

Длительность зондирующих импульсов измеряют обычно на уровне 0,1 от максимального значения  $U_{\text{и}}$ . В зондирующем импульсе, как правило, содержится от 4 до 12 периодов колебаний с ультразвуковой частотой  $f_0$  (рис. 4.3). Период этих колебаний  $T_0$  для частоты ультразвуковых колебаний  $f_0 = 2,5$  МГц равен

$$T_0 = \frac{1}{f_0} = \frac{1}{2 \cdot 500000 \text{ Гц}} = 0,0000004 \text{ с} = 0,4 \text{ мкс.}$$

Отсюда длительность зондирующих импульсов  $t_{\text{и}} = 1,6\text{-}5,0$  мкс для 4 и 9 периодов соответственно.

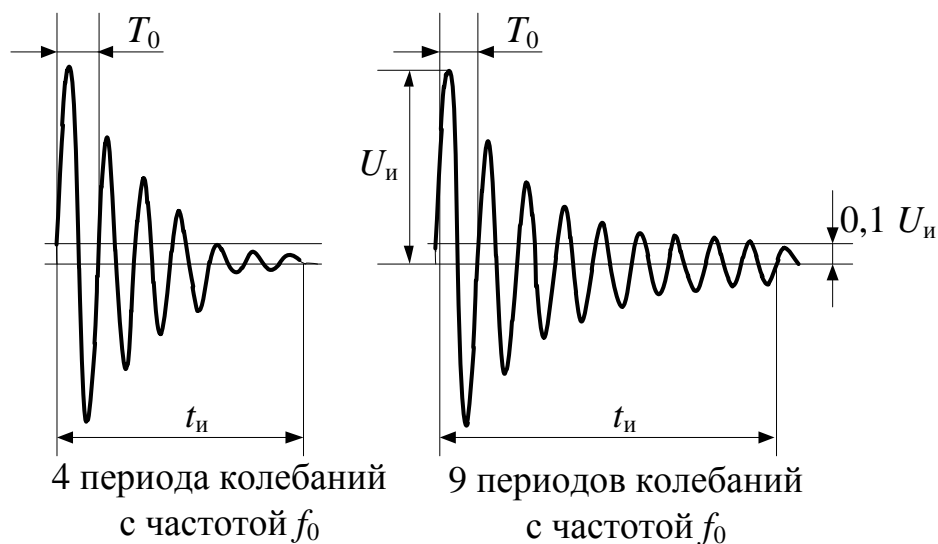


Рисунок 4.3 – Длительность зондирующих импульсов

Чем длиннее зондирующий импульс, тем мощнее излучаемые колебания и тем глубже можно прозвучить контролируемое изделие. В то же время, чем короче зондирующий импульс, тем лучше разрешающая способность дефектоскопа по дальности и меньше «мертвая» зона. Поэтому выбор длительности зондирующего импульса – решение компромиссное.

Частоту заполнения зондирующих колебаний, как уже отмечалось выше, выбирают, исходя из минимальных размеров, требующих выявления дефектов, с одной стороны, и максимальных размеров зерен материала, из которого изготовлено контролируемое изделие – с другой. Размеры зерен,

в свою очередь, влияют на коэффициент затухания ультразвуковых волн в материале изделия. Необходимо, чтобы длина ультразвуковой волны  $\lambda$  была сравнима с минимальным размером обнаруживаемого дефекта и намного больше размера зерна металла.

Как известно, длина ультразвуковой волны  $\lambda$  в среде определяется частотой излучаемых колебаний  $f_0$

$$\lambda = \frac{c}{f_0}; \quad (4.3)$$

- для продольных волн и частоты 2,5 МГц

$$\lambda = \frac{5 \cdot 900}{2 \cdot 500000} = 0,00236 \text{ м} = 2,36 \text{ мм};$$

- для поперечных волн

$$\lambda = \frac{3 \cdot 260}{2 \cdot 500000} = 0,0013 \text{ м} = 1,3 \text{ мм}.$$

**ВНИМАНИЕ!** Не путайте частоту  $f_0$  ультразвуковых колебаний, которая составляет миллионы колебаний в секунду (1–10,0 МГц), и частоту посылок зондирующих импульсов, составляющую всего лишь сотни и тысячи импульсов в секунду (100–4000 Гц).

*Амплитуда* зондирующих импульсов  $U_{\text{и}}$  – это максимальная величина электрического импульса, прикладываемого к пьезопластине ПЭП. Амплитуда  $U_{\text{и}}$  может достигать до 500 В на 1 мм толщины пластины из пьезокерамики. Как правило, если зондирующий импульс имеет экспоненциально затухающую форму, требуется прикладывать к пьезопластине большее напряжение, чем при возбуждении ее зондирующим импульсом колоколообразной формы (рис. 4.4).

В связи с тем, что зондирующий импульс не всегда имеет симметричную форму относительно горизонтальной (временной) оси, для характеристики амплитудного параметра импульса используют величину размаха  $U_p$  первого периода колебаний. В радиотехнике импульс напряжения с высокочастотным заполнением называют радиоимпульсом. Таким образом, электрические колебания, подаваемые для возбуждения пьезопластины, то есть зондирующий импульс, представляют собой радиоимпульс. При выделении амплитудной огибающей этого импульса

образуется видеоимпульс. Оператор на экране дефектоскопа наблюдает в виде видеоимпульсов эхо-сигналы (рис. 4.5), которые формируются при выделении огибающих радиоимпульсов с помощью амплитудного детектора.

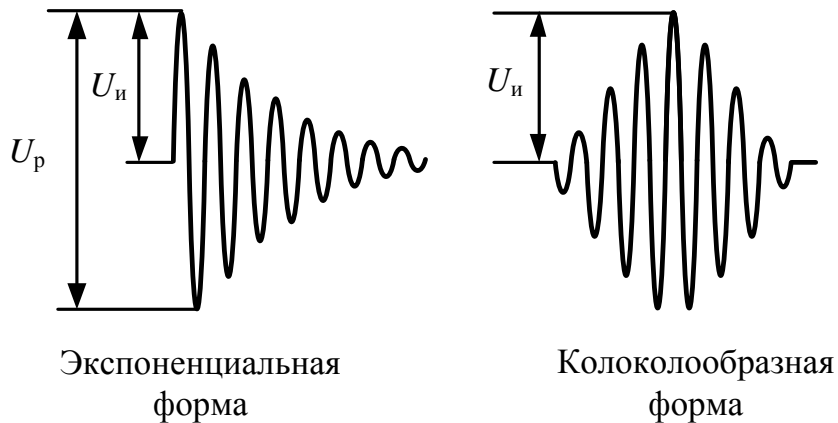


Рисунок 4.4 – Формы зондирующих импульсов

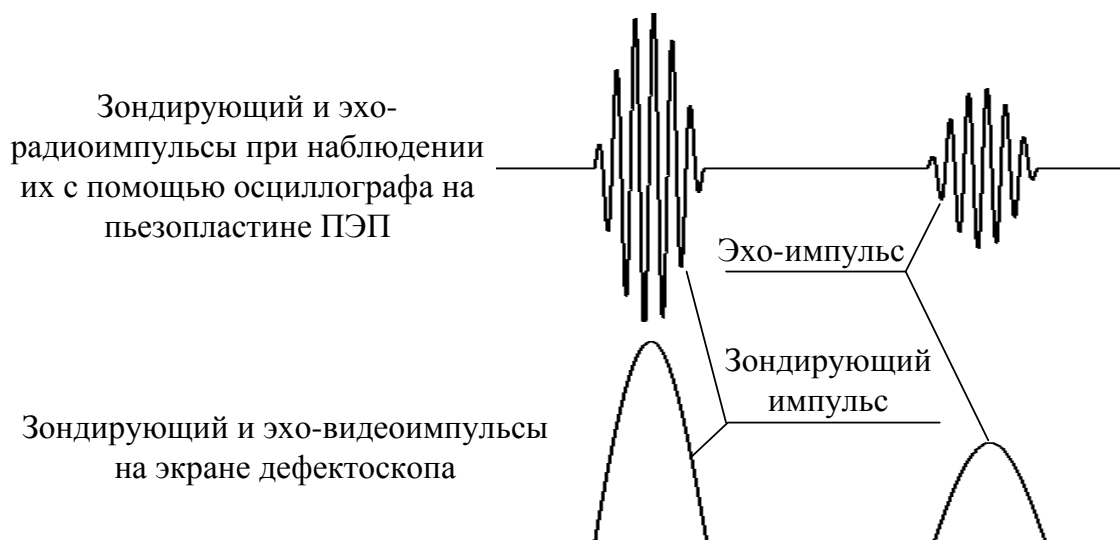


Рисунок 4.5 – Радио- и видеоимпульсы

На рис. 4.6 показан процесс формирования зондирующего и эховидеоимпульсов на экране осциллографа (дефектоскопа) при наличии в озвучиваемом изделии одиночного отражателя (одного дефекта малых размеров), а на рис. 4.7 – этот же процесс при наличии двух отражателей (дефектов малых размеров, находящихся на различных расстояниях от излучателя).

В этом случае расстояние от ПЭП до отражателя определяется из выражения

$$L = \frac{c_l \cdot t}{2}, \quad (4.4)$$

где  $c_l$  – скорость распространения продольной волны,  $t$  – время прохождения импульсом расстояния до дефекта и обратно.

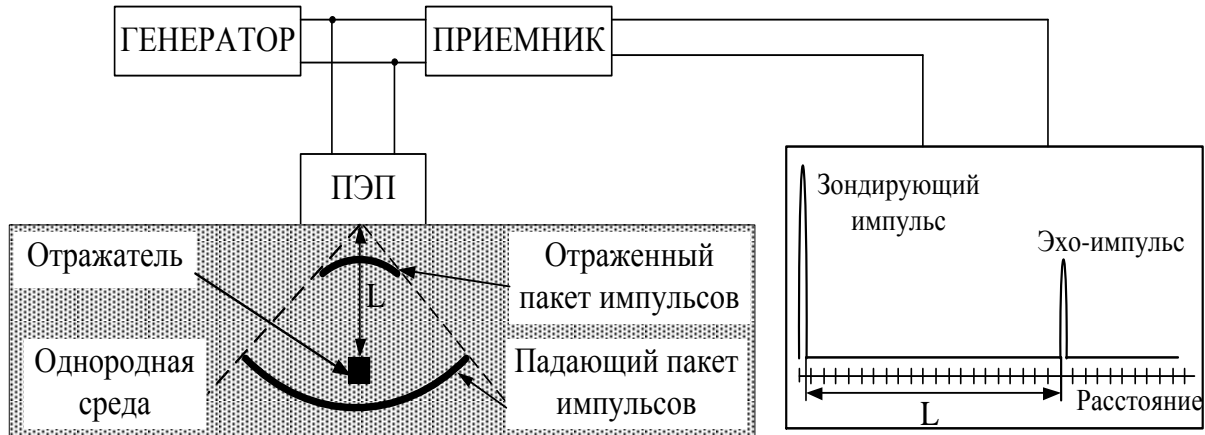


Рисунок 4.6 – Формирование эхо-сигнала от одного отражателя

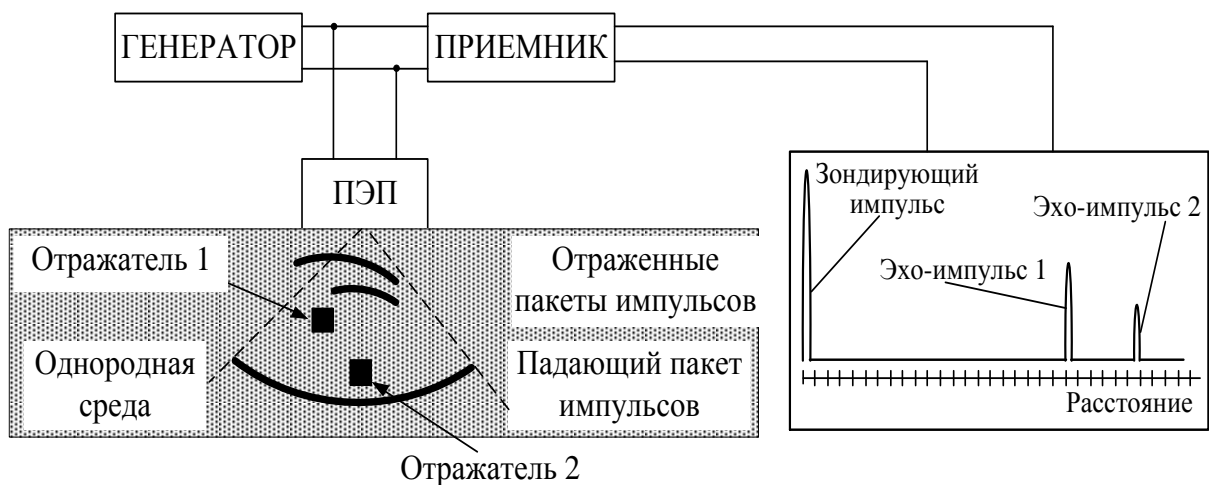


Рисунок 4.7 – Формирование эхо-сигнала от двух отражателей

### Контрольные вопросы

1. Параметры излучаемых зондирующих импульсных колебаний.
2. Разница между частотой следования и заполнения зондирующих импульсов.
3. Формы зондирующих импульсов.
4. Как измеряют длительность зондирующих импульсов?



## РАЗДЕЛ 5. ЭХО-МЕТОД УЛЬТРАЗВУКОВОГО КОНТРОЛЯ

Эхо-метод ультразвуковой дефектоскопии основан на излучении в контролируемое изделие коротких зондирующих импульсов и регистрации эхо-сигнала, отраженного от дефекта. Временной интервал между зондирующим и эхо-импульсами пропорционален глубине залегания дефекта, а амплитуда, в определенных пределах, – отражающей способности (размеру) дефекта.

*К преимуществам эхо-метода относятся:*

- односторонний доступ к изделию;
- относительно большая чувствительность к внутренним дефектам;
- высокая точность определения координат дефектов.

*К недостаткам эхо-метода можно отнести:*

- низкую помехоустойчивость к поверхностным отражателям;
- резкую зависимость амплитуды эхо-сигнала от ориентации дефекта;
- невозможность контроля качества акустического контакта в процессе перемещения ПЭП, так как при отсутствии дефектов на выходе отсутствуют какие-либо сигналы.

Несмотря на указанные недостатки, эхо-метод является наиболее распространенным методом ультразвуковой дефектоскопии изделий. Его отличительной особенностью является то, что при контроле изделий регистрируются и анализируются практически все сигналы, приходящие из изделия после излучения зондирующих колебаний.

Поэтому при контроле изделий с плоскопараллельными поверхностями возможен одновременный прием эхо-сигналов как от дефекта, так и от противоположной поверхности (рис. 5.1). Причем временное положение эхо-сигнала от дефекта относительно зондирующего импульса пропорционально глубине  $h$  его залегания

$$t = \frac{2h}{c}, \quad (5.1)$$

где  $c$  – скорость распространения ультразвуковых колебаний в изделии.

Амплитуда эхо-импульса сложным образом зависит от величины отражателя (дефекта), свойств его поверхности и его ориентации, а также

затухания ультразвуковой волны в изделии и расстояния до дефекта.

Естественно, интервал времени между зондирующим импульсом и эхо-сигналом от противоположной (донной) поверхности пропорционален высоте  $H$  изделия.

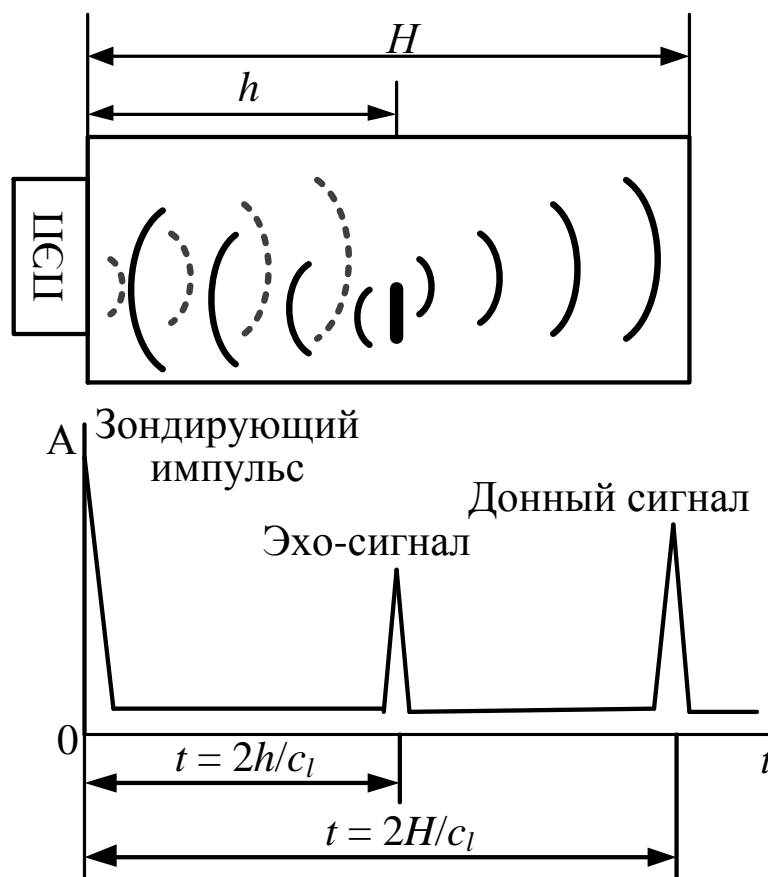


Рисунок 5.1 – Формирование эхо- и донного сигналов

**Сигнал от противоположной поверхности может отсутствовать при следующих ситуациях:**

- донная поверхность непараллельна поверхности ввода ультразвуковых колебаний (рис. 5.2);
- дефект имеет значительный размер, полностью перекрывающий ультразвуковой пучок (рис. 5.3);
- высота (толщина) изделия настолько велика, что вследствие затухания ультразвуковых колебаний амплитуда эхо-сигнала от противоположной поверхности имеет очень малую величину (рис. 5.4).

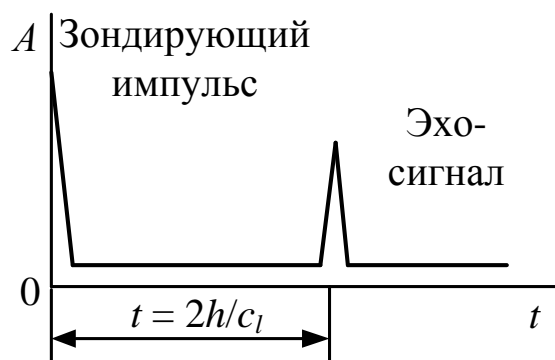
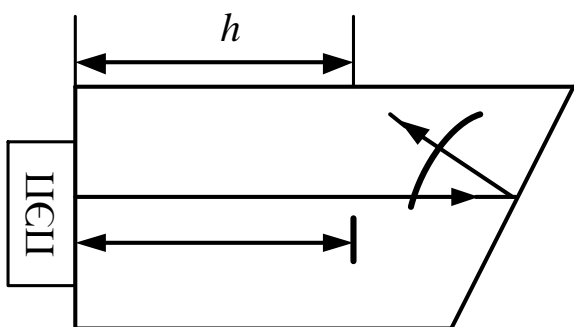


Рисунок 5.2 – При непараллельных поверхностях донный сигнал отсутствует

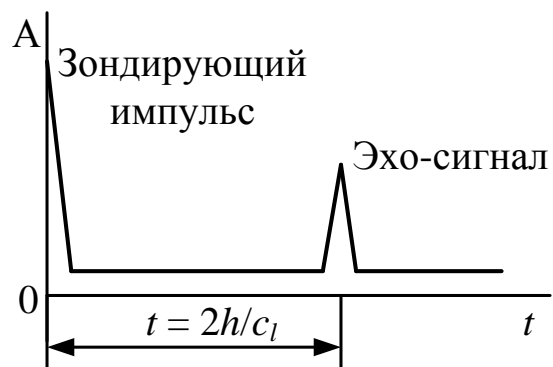
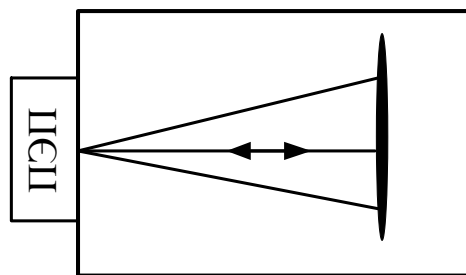


Рисунок 5.3 – Донный сигнал отсутствует, так как дефект полностью перекрывает ультразвуковой пучок

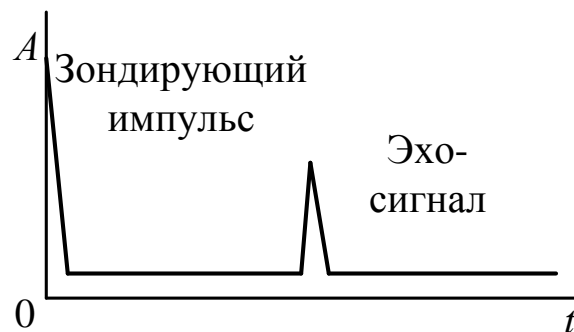
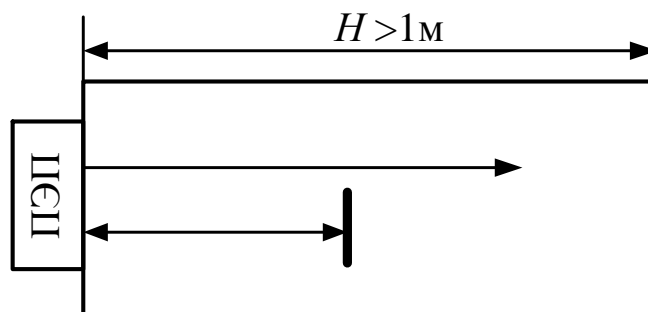


Рисунок 5.4 – Расстояние до противоположной поверхности значительное. Донный сигнал отсутствует

При контроле изделий небольших толщин можно получить целую серию многократно переотраженных от плоскопараллельных стенок изделия эхо-сигналов (рис. 5.5). Вследствие затухания ультразвуковых колебаний многократные отражения последовательно уменьшаются по амплитуде. Расстояние между отдельными отражениями – величина постоянная, зависящая от толщины изделия.

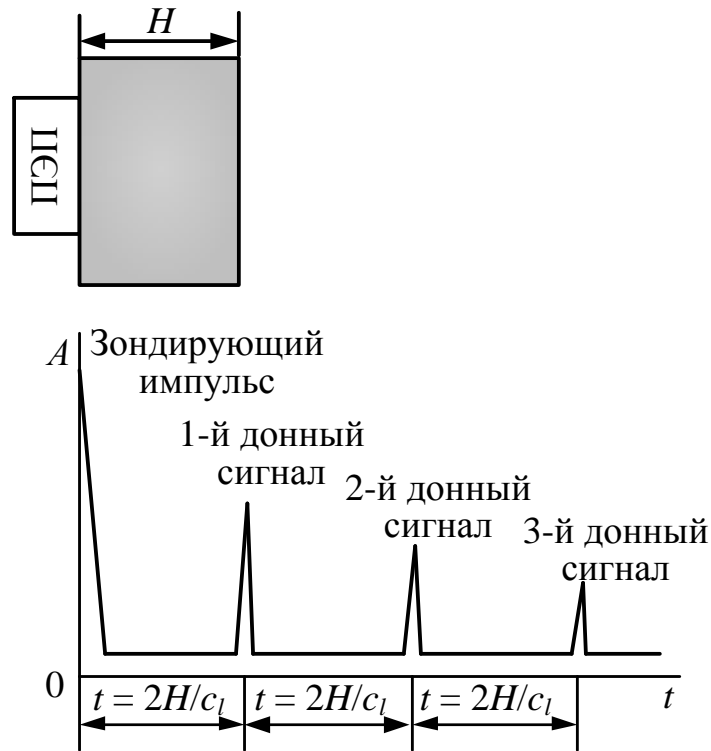


Рисунок 5.5 – Многократные отражения ультразвуковых колебаний в тонком изделии

При наклонном вводе ультразвуковых колебаний временной интервал между зондирующим импульсом и эхо-сигналом от дефекта выглядит следующим образом (рис. 5.6):

$$t = \frac{2r}{c_t} = \frac{2h}{c_t \cdot \cos \alpha}, \quad (5.2)$$

где  $c_t$  – скорость поперечных ультразвуковых колебаний в изделии,  $\alpha$  – угол ввода ультразвуковых колебаний,  $r$  – расстояние от точки ввода ультразвуковых колебаний до дефекта.

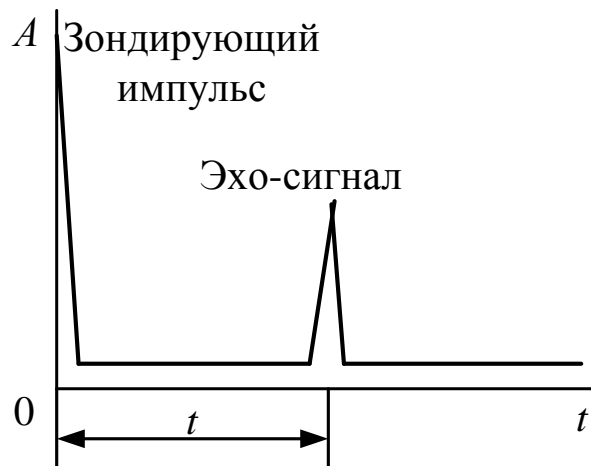
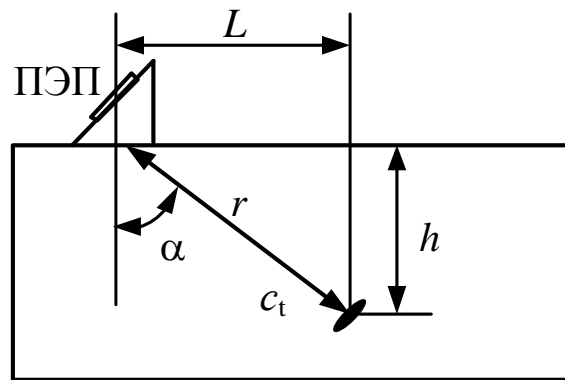


Рисунок 5.6 – Ввод ультразвуковых колебаний с помощью наклонных ПЭП

**ВНИМАНИЕ!** Угол ввода ультразвуковых колебаний в изделие в дефектоскопии всегда отсчитывается от нормали к поверхности ввода УЗК.

Зная время  $t$  распространения ультразвуковых колебаний до дефекта и обратно и скорость  $c_l$  ультразвуковых колебаний в изделии, можно легко определить глубину  $h$  залегания дефекта:

при обнаружении дефекта прямым ( $\alpha = 0^\circ$ ) преобразователем

$$h = \frac{c_l \cdot t}{2}, \quad (5.3)$$

при обнаружении его наклонным преобразователем

$$h = \frac{(c_l \cdot t \cdot \cos \alpha)}{2}, \quad (5.4)$$

В последнем случае бывает также полезным знание расстояния  $L$  между точкой ввода ультразвуковых колебаний и проекцией дефекта на поверхность сканирования (рис. 5.6)

$$L = \frac{(c_l \cdot t \cdot \sin \alpha)}{2}. \quad (5.5)$$

В приведенных выше выражениях время  $t$  – это время с момента излучения зондирующего импульса до момента прихода эхо-сигнала на пьезопластину ПЭП. В реальных устройствах пьезопреобразователь состоит из отдельных конструктивных элементов, и пьезопластина не соприкасается непосредственно с контролируемым изделием.

*Датчик* – устройство, преобразующее один вид энергии в другой. Ультразвуковой датчик преобразует электрическую энергию в механическую (звуковая волна) и наоборот.

В прямых преобразователях ( $\alpha = 0^\circ$ ) между пьезоэлементом и поверхностью контролируемого изделия находится протектор (рис. 5.7), выполняющий функции:

- защиты пьезоэлемента от износа;
- улучшения согласования пьезоэлемента с контролируемым изделием;
- улучшения акустического контакта.

Естественно, при прохождении ультразвуковых колебаний через протектор с толщиной  $h_{\text{п}}$  затрачивается определенное время  $t_{\text{п}}$  (время в протекторе), которое необходимо учитывать при точном определении глубины залегания дефекта

$$h = \frac{c_l \cdot (t - 2t_{\text{п}})}{2}. \quad (5.6)$$

Обычно толщина протектора в прямых ( $\alpha = 0^\circ$ ) преобразователях, работающих в совмещенном режиме, составляет **0,5-2,0 мм**. При этом время  $t_{\text{п}}$  весьма мало (не превышает одной мкс) и во многих случаях может не учитываться.

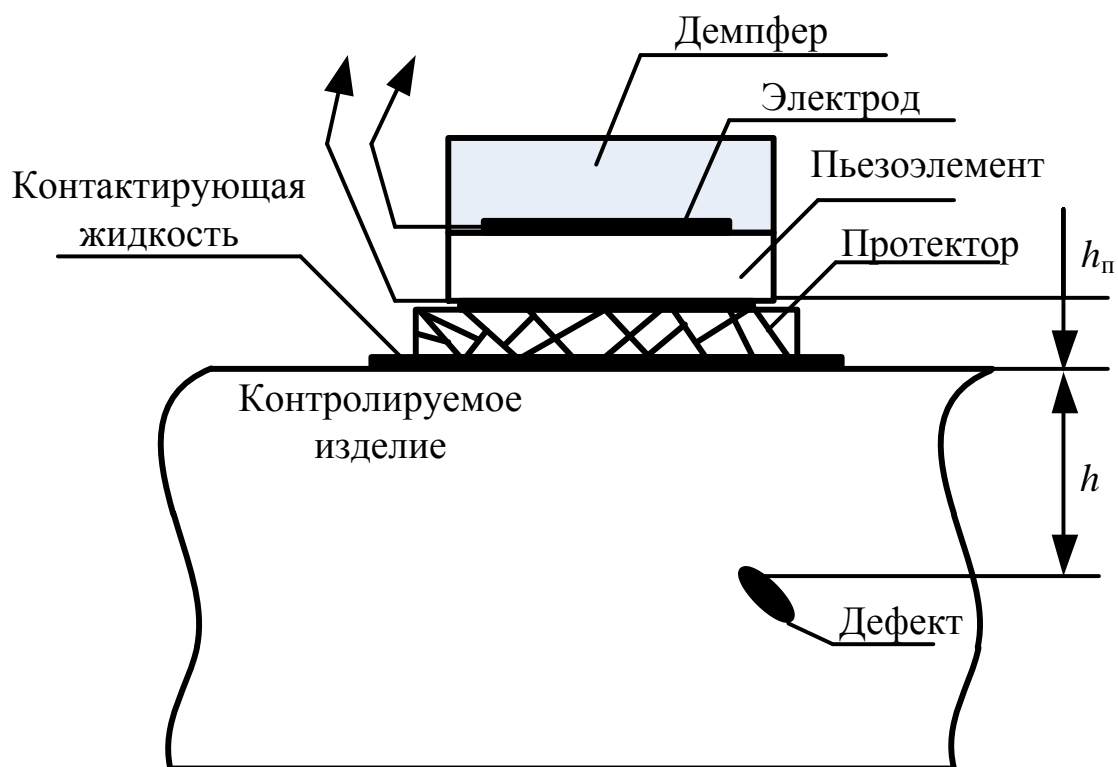


Рисунок 5.7 – Ввод ультразвуковых колебаний с помощью прямого ( $\alpha = 0^\circ$ ) преобразователя

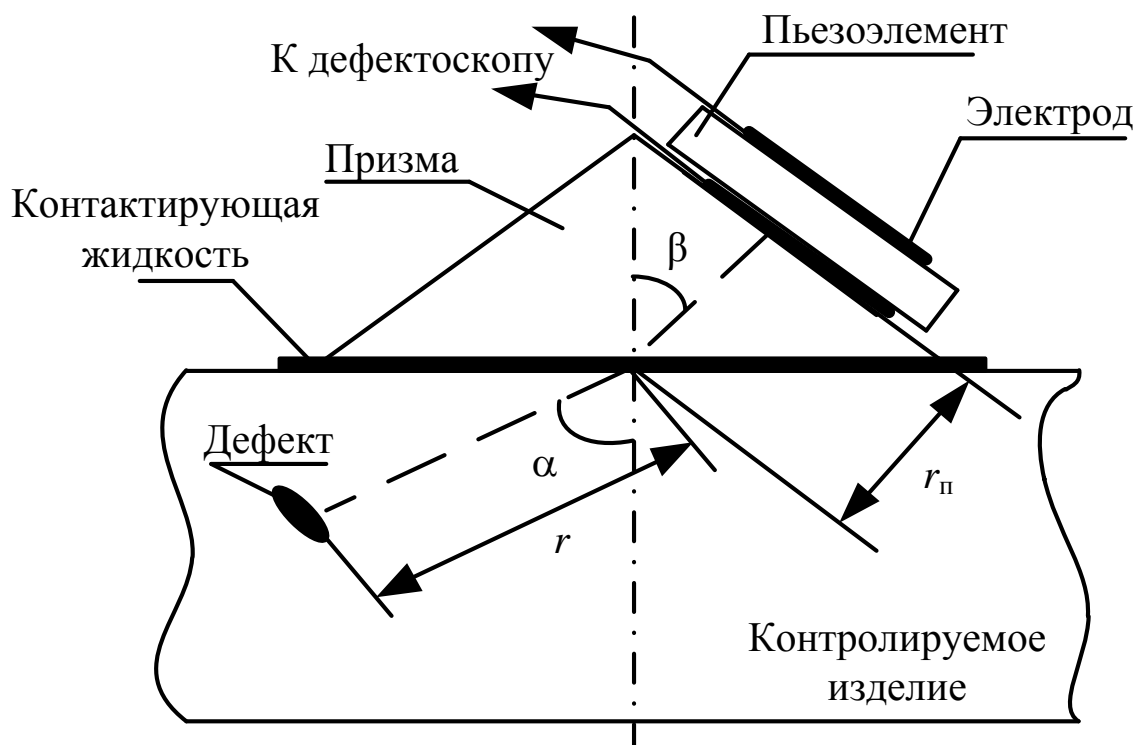


Рисунок 5.8 – Путь ультразвуковых колебаний при наклонном вводе

При наклонном (рис. 5.8) вводе ультразвуковых колебаний пьезопластину в преобразователе помещают на специальную призму из органического стекла (или из другого звукопроводящего материала). В этом случае путь ультразвуковых колебаний складывается из пути в призме  $r_{\text{п}}$  и пути  $r$  в контролируемом изделии. Причем путь в призме искателя в зависимости от угла призмы  $\beta$  (что аналогично углу ввода колебаний  $\alpha$ ) составляет несколько (от 4 до 9) миллиметров, а двойное время пробега ультразвуковых колебаний по призме ПЭП  $2t_{\text{п}}$  – от 3 до 8 мкс. При определении (расчете) координат дефектов пренебрежение этой величиной недопустимо. Поэтому точное выражение для расчета глубины залегания дефекта при наклонном вводе ультразвуковых колебаний предусматривает вычитание из измеренного значения времени  $t$  величины задержки в призме  $2t_{\text{п}}$

$$h = \frac{[c_t \cdot (t - 2t_{\text{п}}) \cdot \cos \alpha]}{2}. \quad (5.7)$$

Для упрощения процедуры измерения координат выявленных дефектов в дефектоскопах предусматривается аппаратное вычитание времени  $2t_{\text{п}}$ , т. е. в дефектоскопе производится компенсация (вычитание) времени задержки ультразвука в призме электронными средствами.

Первичными измеряемыми характеристиками сигналов от дефектов при эхо-импульсном методе ультразвукового контроля являются:

- максимальная амплитуда  $U_{\text{э}}$  эхо-сигнала;
- временное положение  $t_{\text{э}}$  эхо-сигнала относительно зондирующего импульса.

Указанные параметры измеряют при расположении преобразователя в точке, где наблюдается наибольшая амплитуда эхо-сигнала от дефекта (рис. 5.9), т. е. тогда, когда дефект озвучивается центральным лучом (осью) диаграммы направленности ПЭП.

Амплитуду эхо-импульса на экране дефектоскопа можно измерять в вольтах или милливольтх. В дефектоскопии не применяют измерение абсолютного значения амплитуды. Обычно амплитуду сигнала от дефекта сравнивают с амплитудой эхо-сигнала от искусственного отражателя заданной геометрической формы, чаще всего – цилиндрического сверления



в специальном (стандартном) образце. Для удобства это сравнение производится не в разгах  $U_1 / U_2$ , а в децибелах

$$N = 20 \cdot \lg \left( \frac{U_1}{U_2} \right). \quad (5.8)$$

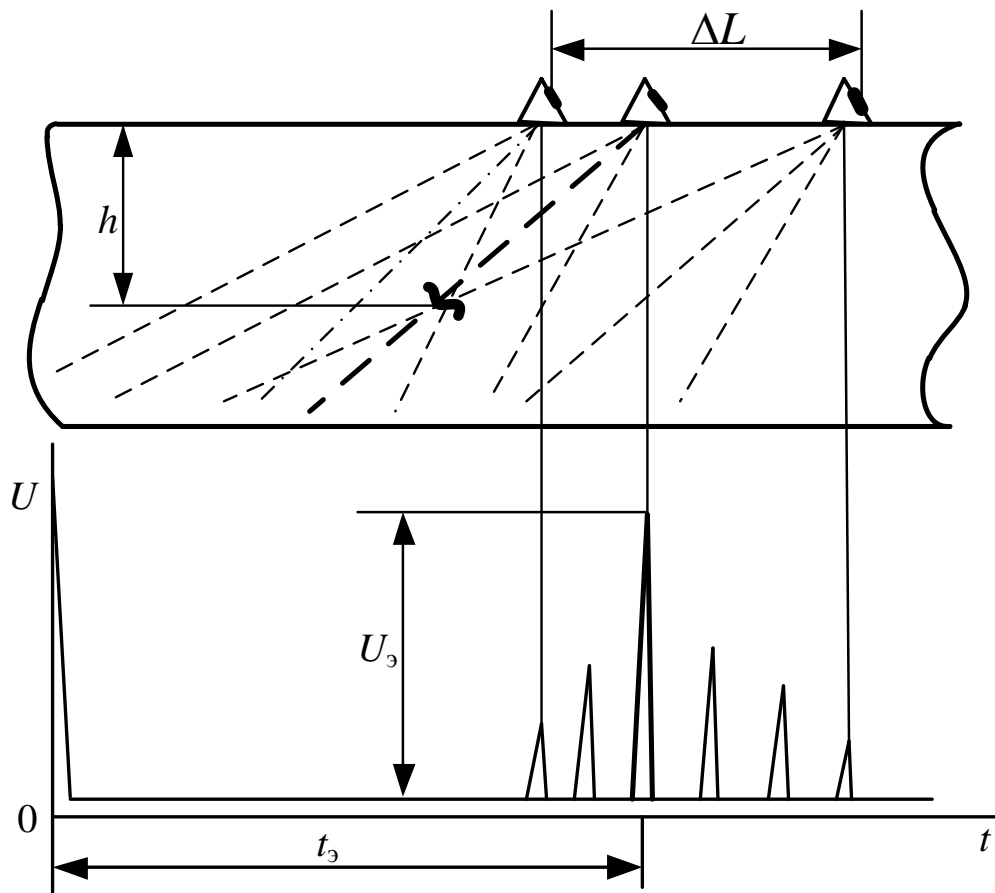


Рисунок 5.9 – Схема измерения характеристик эхо-сигналов

Децибел – специфическая единица, служащая в основном для сравнительной характеристики различных уровней (интенсивности звука, громкости, звукового давления т. д.), а также для оценки эффективности средств борьбы с шумами.

*Децибелы.* В ультразвуковой дефектоскопии амплитуды эхо-сигналов изменяются в очень широких пределах, поэтому для сравнения амплитуд сигналов используют логарифмические единицы – децибелы (русское обозначение – дБ, международное – dB). Децибел не физическая величина, а математическое понятие. Как и проценты (%), децибелы безразмерны и

служат для сравнения двух одноименных величин, но это понятие имеет более широкое значение.

Число децибел  $N$ , на которое сигнал с амплитудой  $U$  отличается от некоторого исходного уровня  $U_0$ , равно

$$N = 20 \cdot \lg \left( \frac{U}{U_0} \right). \quad (5.9)$$

Если амплитуда  $U$  сигнала больше исходного уровня  $U_0$  то число  $N$  положительное (положительные децибелы). При уровне  $U$  сигнала меньше исходного уровня  $U_0$  значение  $N$  – отрицательное (говорят об отрицательных децибелах).

На практике обычно не занимаются расчетом десятичных логарифмов, а используют заранее рассчитанную таблицу или шкалу (рис. 5.10) перевода.

Весьма часто значения ослабления амплитуд сигналов приводят в отрицательных децибелах, не упоминая слово отрицательный, а коэффициент усиления приемника – в положительных, также не обращая внимания на то, что децибелы положительные.

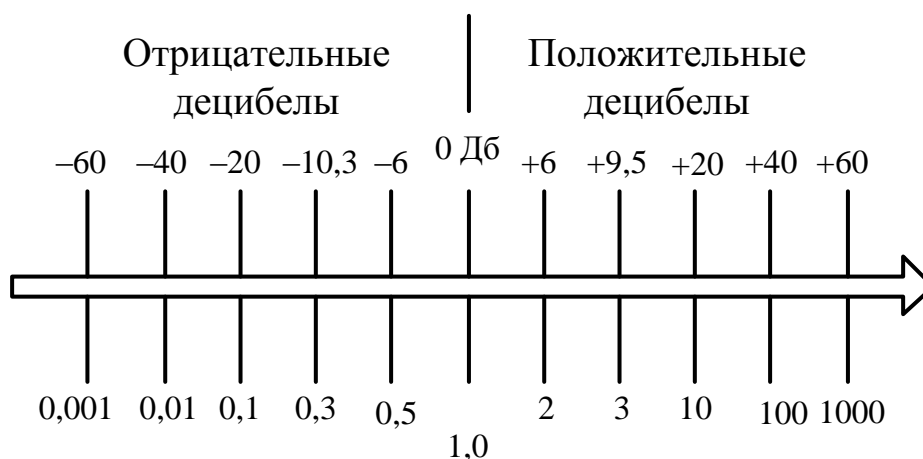


Рисунок 5.10 – Шкала соответствия отношений амплитуд сигналов и децибел

Временное положение  $t_3$  эхо-сигналов с помощью приведенных выше выражений для прямого и наклонного ПЭП пересчитывают в значения глубины  $h$  (или  $H$ ) залегания дефекта в миллиметрах. Как правило, линию развертки на экране дефектоскопа калибруют в миллиметрах глубины

залегания дефекта.

В процессе перемещения ПЭП над зоной локации дефекта вследствие озвучивания его разными лучами диаграммы направленности формируется определенная амплитудная огибающая пачки эхо-сигналов (рис. 5.9). Таким образом, при перемещении ПЭП над компактным (точечным) дефектом Д эхо-импульсы от него наблюдаются на некотором участке протяженностью  $\Delta L$ .

Поскольку ширина пучка (ширина диаграммы направленности ПЭП) зависит от того, на каком уровне она определяется, то и условная длина  $\Delta L$  изменяется в некоторых пределах при изменении усиления дефектоскопа.

*Условная высота  $\Delta H$  дефекта* – это разность показаний дефектоскопа, снятых при тех же положениях ПЭП, при которых измерялся условный размер  $\Delta L$  (рис. 5.11).

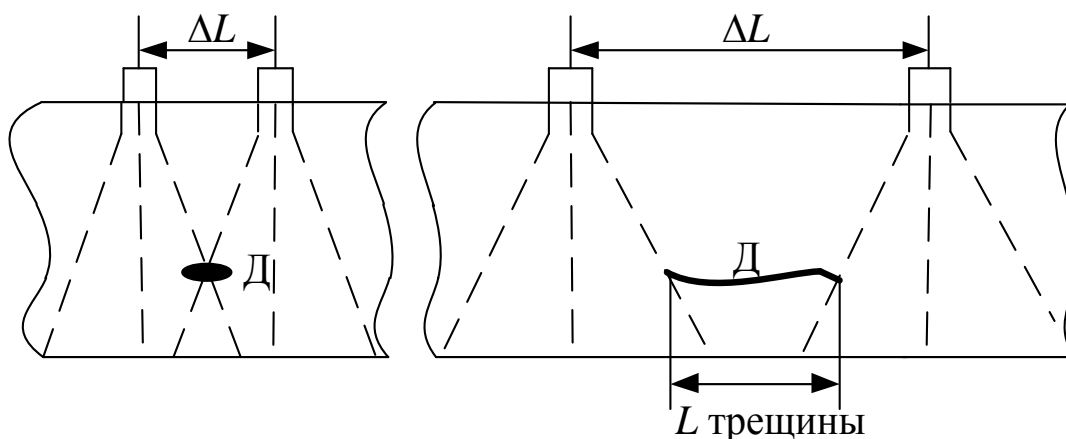


Рисунок 5.11 – Измерение условной длины  $\Delta L$  дефекта

*Условная ширина  $\Delta X$  дефекта (мм)* измеряется по длине зоны между крайними положениями ПЭП, перемещаемого вдоль контролируемого сечения (рис. 5.12).

Крайними положениями ПЭП при измерениях условных размеров  $\Delta L$ ,  $\Delta H$  и  $\Delta X$  считают положения, при которых амплитуда эхо-сигнала от выявленного дефекта уменьшается до уровня срабатывания автоматического сигнализатора дефектоскопа, настроенного в соответствии с требованиями нормативной документации на контроль конкретного изделия.

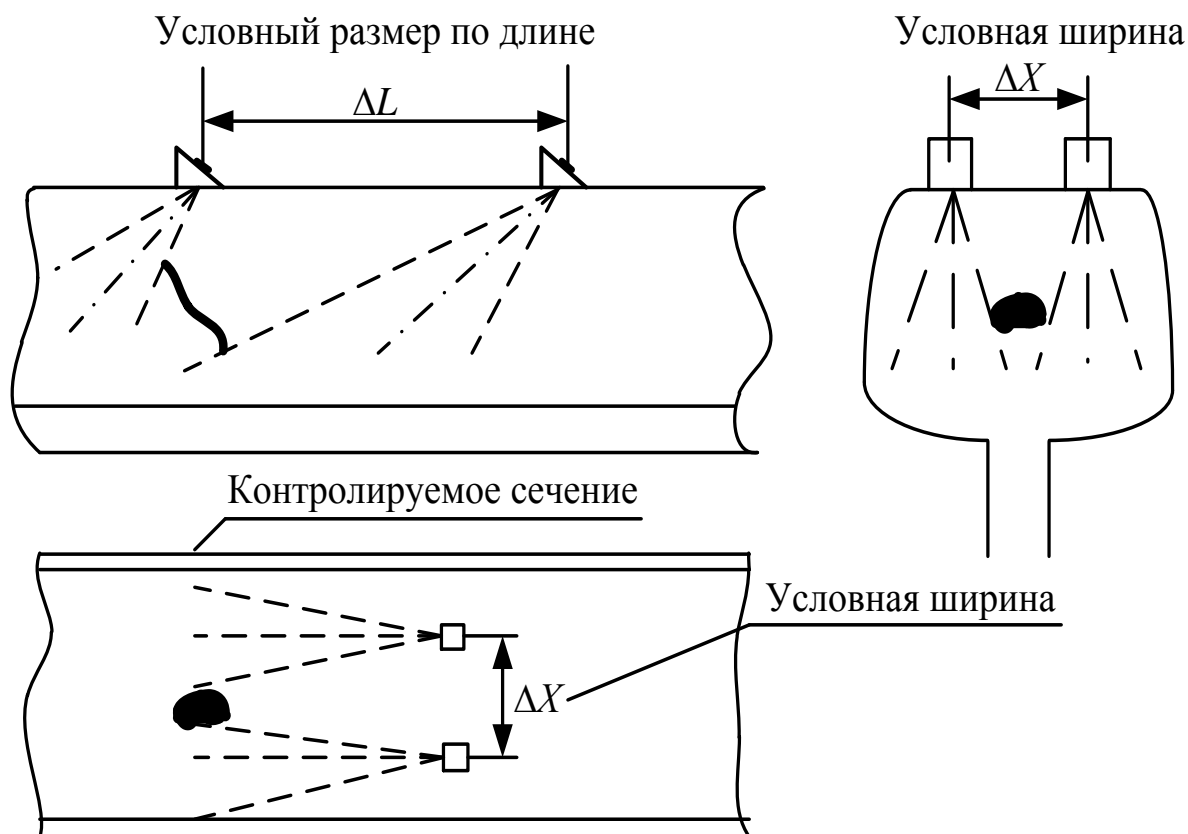


Рисунок 5.12 – Измерение условной длины  $\Delta L$  и ширины  $\Delta X$  дефекта в головке рельса

### Контрольные вопросы

1. Что такое эхо-метод?
2. Какие преимущества и недостатки эхо-метода?
3. В каких ситуациях может отсутствовать сигнал от противоположной поверхности?
4. От чего отсчитывается угол ввода ультразвуковых колебаний в изделие?
5. Формулы для определения глубины залегания дефекта для прямого и наклонного преобразователей.
6. Что такое ультразвуковой датчик, из чего он состоит (прямой и наклонный)?
7. В чем измеряют амплитуду эхо-импульса на экране дефектоскопа?
8. Что такое условная высота и ширина дефекта?

## РАЗДЕЛ 6. ОТРАСЛЕВЫЕ СТАНДАРТНЫЕ ОБРАЗЦЫ

Стандартные образцы применяют для обеспечения единства измерений, проверки основных параметров при:

- аттестации и проверке работоспособности ПЭП;
- метрологической поверке ультразвуковых дефектоскопов;
- настройке ультразвукового дефектоскопа на заданный режим работы для контроля конкретного изделия.

### 6.1. Стандартный образец СО-1

Стандартный образец **СО-1** (рис. 6.1), изготовленный по ГОСТ 14782-86 из органического стекла с заданными акустическими свойствами, используется для настройки дефектоскопов на заданную условную чувствительность, выражаемую в миллиметрах. Глубина расположения эталонных отражателей диаметром **2 мм** для определения условной чувствительности указана в миллиметрах на образце около каждого отражателя. Исходящие от отражателей линии соответствуют углам падения волны (углу призмы пьезопреобразователя, выполненной из органического стекла), равным **30°, 40° и 50°**.

Проверку глубиномера дефектоскопов осуществляют путем измерения интервалов времени между зондирующим и донными импульсами, отраженными от прорези длиной **70 мм**, которая находится на расстоянии **27 мм** от рабочей плоскости паза в образце. Интервал времени между зондирующим и первым донным импульсами, а также между любыми двумя последующими донными импульсами должен составлять **20 мкс**.

Концентрические отверстия и ступенчатый выступ на образце СО-1 позволяют оценить разрешающую способность по лучу (по дальности) при контроле наклонным и прямым Преобразователями, а шкала со стороны Б (рис. 6.1) предназначена для определения угла призмы наклонных ПЭП с призмой из органического стекла.

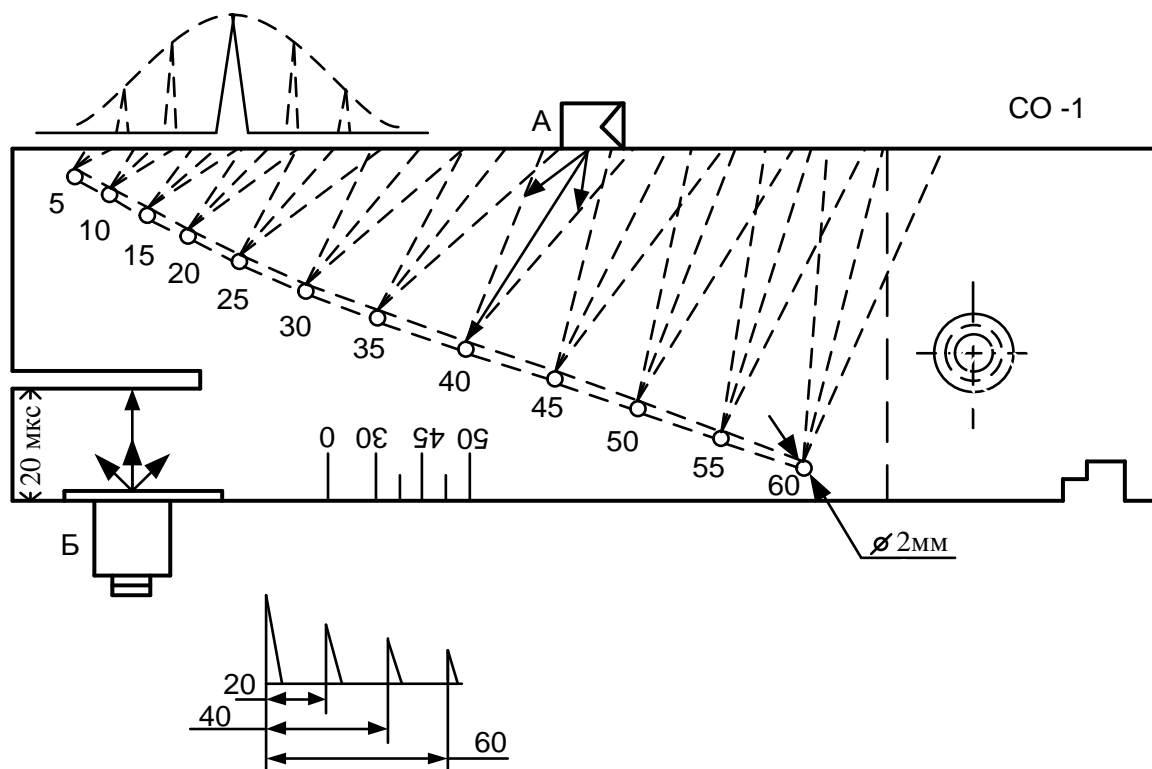


Рисунок 6.1 – Стандартный образец СО-1 (ГОСТ 14782-86):

А – положение преобразователя при определении условной чувствительности;  
Б – то же при проверке глубиномера дефектоскопа

## 6.2. Стандартный образец СО-2

Стандартный образец **СО-2** (рис. 6.2), изготовленный по ГОСТ 14782-86 из стали **Ст20** или **Ст3**, используется:

- для измерения угла ввода луча;
- при проверке глубиномера дефектоскопов путем измерения интервалов времени между зондирующим и донным импульсами при расположении прямого преобразователя на рабочей поверхности образца. Интервал времени между зондирующим и первым донным импульсами и между любыми двумя последующими донными импульсами должен составлять **20 мкс**;
- при проверке «мертвой» зоны дефектоскопа с преобразователем, настроенным на заданную условную чувствительность;
- для настройки дефектоскопов на заданную условную

чувствительность, измеряемую в децибелах.

Измерение угла ввода луча и настройку дефектоскопа на заданную условную чувствительность выполняют по эхо-импульсам от отражателя диаметром 6 мм на глубине 44 мм. Для проверки «мертвой» зоны дефектоскопа с преобразователем в образце СО-2 высверлены отверстия диаметром 2 мм на глубинах 3, 6 и 8 мм.

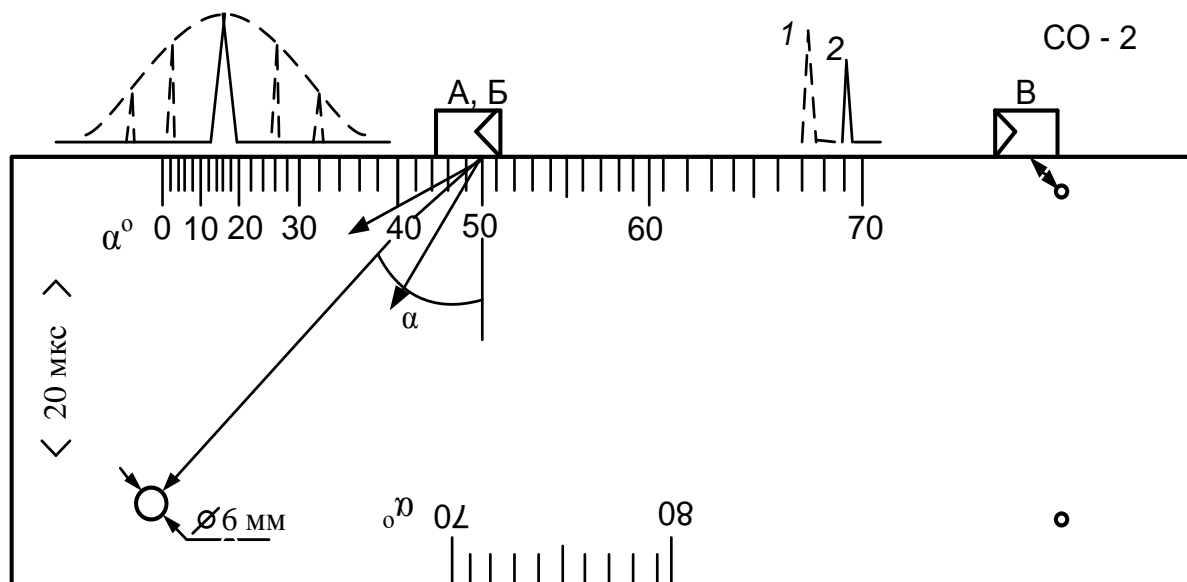


Рисунок 6.2 – Стандартный образец СО-2 (ГОСТ 14782-86):

А – положение преобразователя при определении угла ввода; Б – то же при определении условной чувствительности в децибелах; В – то же при определении «мертвой» зоны; 1 – зондирующий импульс; 2 – эхо-сигнал от отверстия диаметром 2 мм на глубине 8 мм

### 6.3. Стандартный образец СО-3

Стандартный образец **СО-3** (рис. 6.3), изготовленный по ГОСТ 14782-86 из стали **Ст20** или **Ст3**, используется для определения точки выхода луча и направления акустической оси наклонного преобразователя. Нуль шкалы на образце совпадает с геометрическим центром полуокружности образца.

Стандартный образец **СО-3Р** (рис. 6.4), изготовленный по ГОСТ 18576-85 из стали **Ст20** или **Ст3**, практически объединяет

возможности СО-2 и СО-3 и используется:

- для определения точки выхода луча;
- для измерения угла ввода луча;

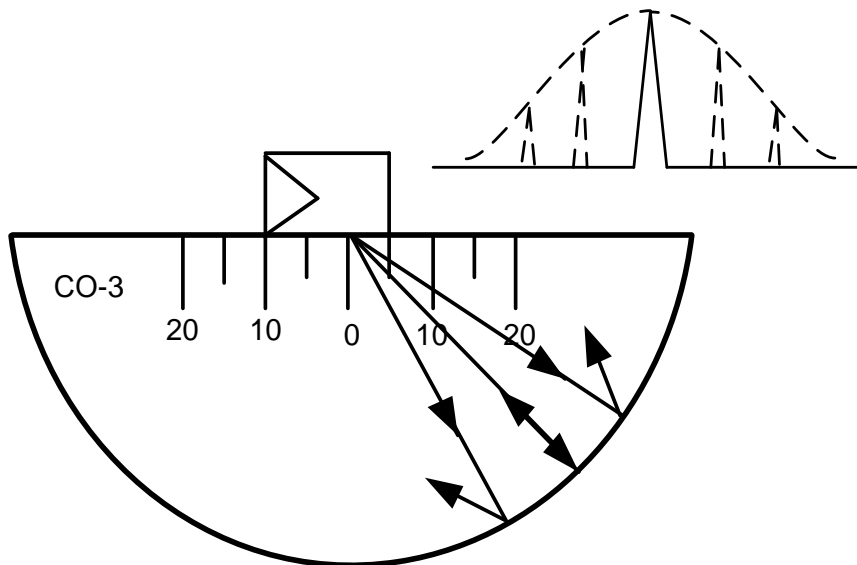


Рисунок 6.3 – Стандартный образец СО-3 (ГОСТ 14782-86)

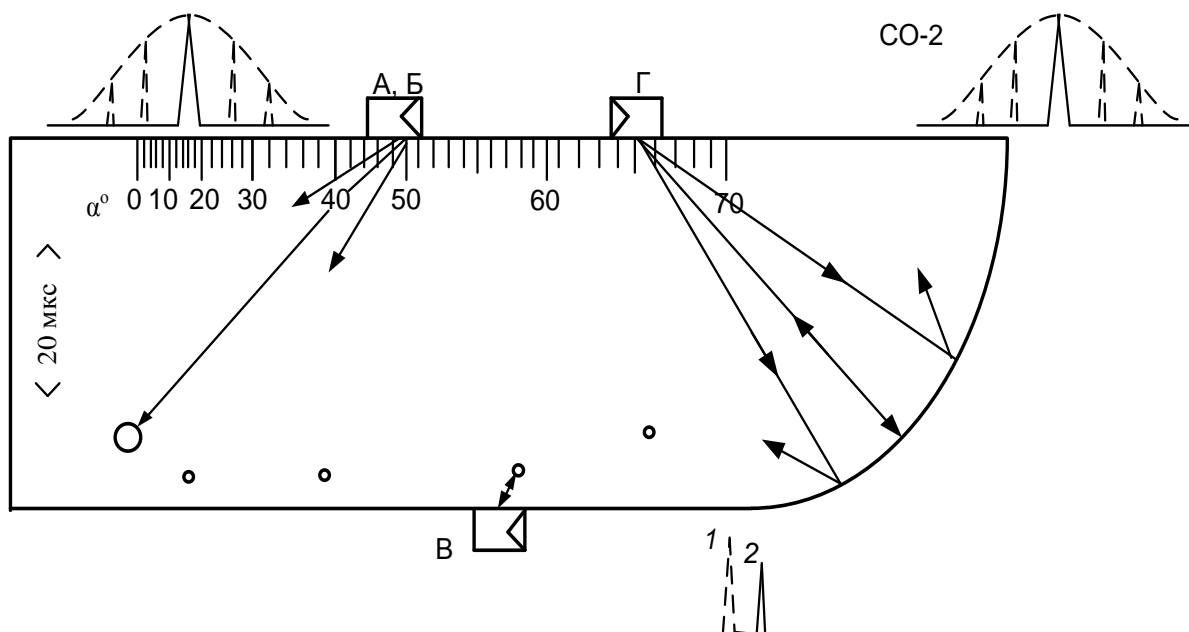


Рисунок 6.4 – Стандартный образец СО-3Р (ГОСТ 18576-85):

А, Б – положение преобразователя соответственно при определении угла ввода луча и условной чувствительности; В – то же при определении «мертвой» зоны: 1 – зондирующий импульс; 2 – эхо-сигнал от отверстия диаметром 2 мм на глубине 8 мм; Г – то же при определении точки выхода луча



- при проверке глубиномера дефектоскопа путем измерения интервалов времени между зондирующим и донным импульсами при расположении прямого преобразователя на рабочей поверхности образца. Интервал времени между зондирующим и первым донным импульсами и между любыми двумя последующими донными импульсами должен составлять **20 мкс**;
- при проверке «мертвой» зоны дефектоскопа с преобразователем, настроенным на заданную условную чувствительность;
- для настройки дефектоскопов на заданную условную чувствительность, измеряемую в децибелах

#### 6.4. Настройка параметров контроля

*Определение точки выхода луча ПЭП.* Под **точкой выхода** луча понимают точку пересечения акустической оси ультразвукового луча с контактной поверхностью преобразователя (рис. 6.5, 6.6).

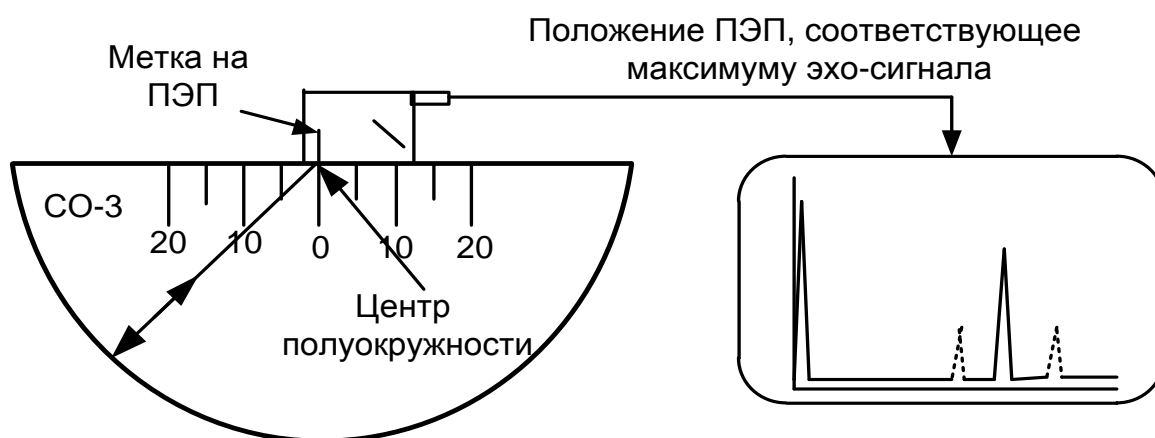


Рисунок 6.5 – Определение точки выхода луча ПЭП на стандартном образце СО-3

Положение точки выхода луча на призме (корпусе) преобразователя проверяют по стандартному образцу СО-3 (рис. 6.5) или стандартному образцу СО-3Р (рис. 6.6). Перемещая преобразователь по рабочей поверхности образца, выбирают такое его положение, при котором

амплитуда эхо-сигнала от вогнутой цилиндрической поверхности наибольшая. В этом случае точка выхода луча совпадает с геометрическим центром полуокружности в образце СО-3 или СО-3Р. Если метка, обозначающая точку выхода луча, не соответствует действительному положению последней (или отсутствует), то на призму (корпус) преобразователя следует нанести новую метку.

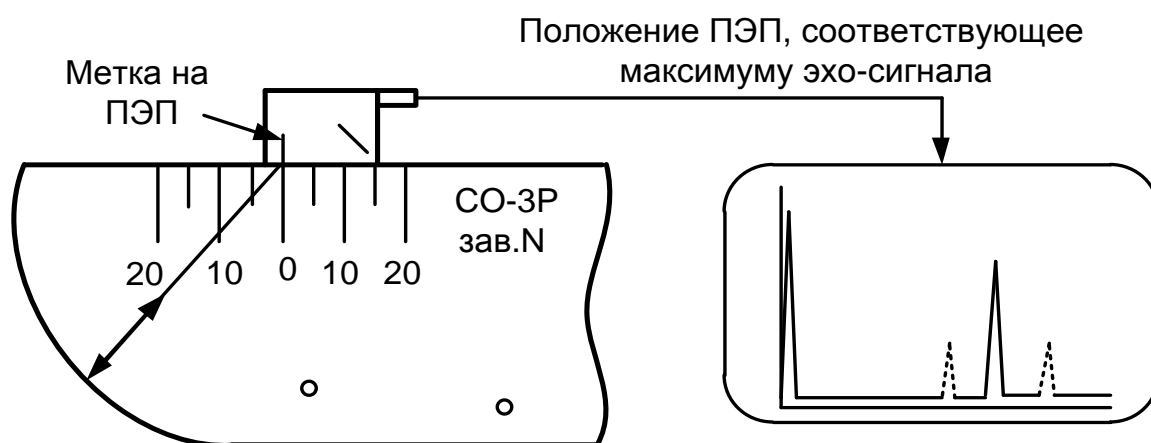


Рисунок 6.6 – Определение точки выхода луча ПЭП на стандартном образце СО-3Р

При определении точки выхода луча следует также убедиться, что максимальная амплитуда эхо-сигнала соответствует положению преобразователя, при котором его боковые грани (плоскости) параллельны боковым плоскостям стандартного образца СО-3 или СО-3Р (рис. 6.6).

Расстояние между точкой ввода луча и передней гранью корпуса наклонного ПЭП называется стрелой преобразователя и обозначается буквой  $n$  (рис. 6.7). Этот параметр весьма важен при ультразвуковом контроле сварных соединений с валиком усиления. Чем меньше стрела преобразователя, чем ближе при проверке качества сварки можно приблизить ПЭП к зоне сварного шва. Для используемых на практике ПЭП  $n = 9-15$  мм.

*Определение угла ввода луча ПЭП.* Под углом ввода луча  $\alpha$  понимают угол между нормалью к поверхности, на которой установлен преобразователь, и линией, соединяющей центр цилиндрического

отражателя с точкой выхода луча при установке преобразователя в положение, при котором амплитуда эхо-сигнала от отражателя наибольшая.

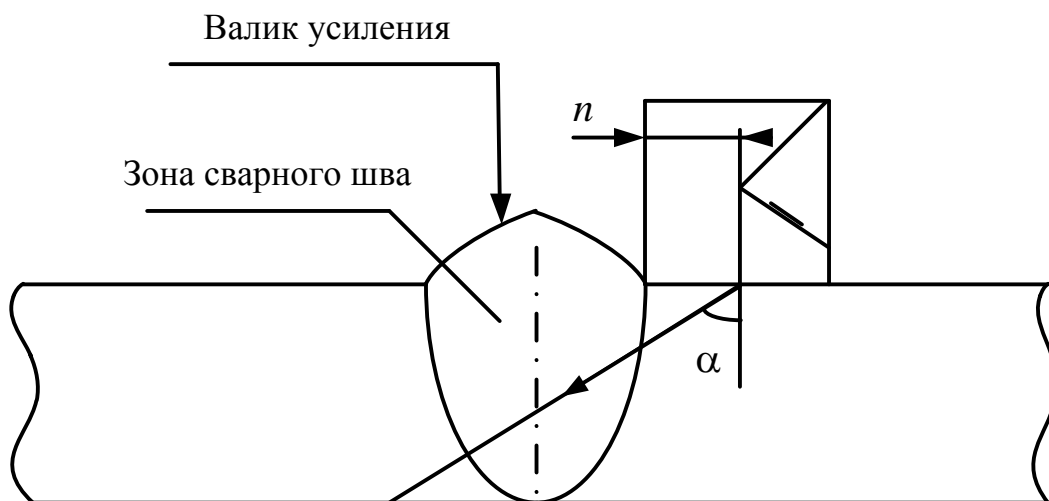


Рисунок 6.7 – Расположение ПЭП при контроле сварного шва

Угол ввода луча измеряют по стандартному образцу СО-2 или стандартному образцу СО-3Р (рис. 6.8).

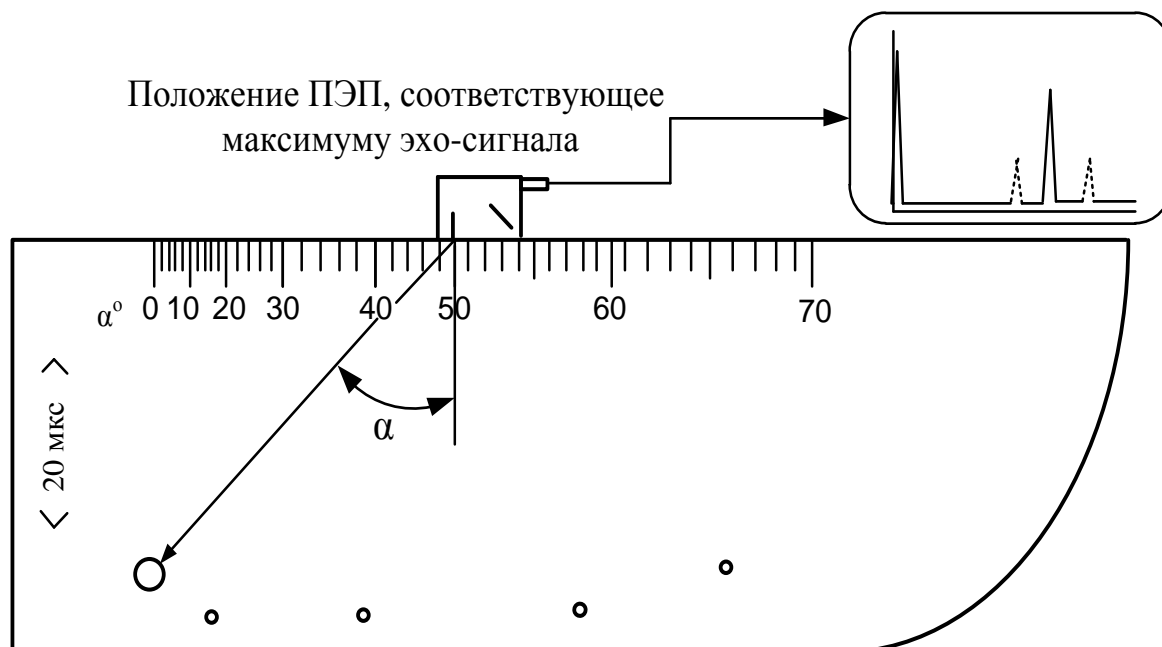


Рисунок 6.8 – Определение угла  $\alpha$  ввода луча на стандартном образце СО-3Р

Угол ввода отсчитывают по шкале стандартного образца против метки, обозначающей точку выхода луча, при установке преобразователя в положение, соответствующее максимальной амплитуде эхо-сигнала от отверстия диаметром 6 мм на глубине 44 мм. Например, измеренный угол ввода луча для преобразователя с углом призмы  $40^\circ$  должен быть равен  $50^\circ \pm 2^\circ$ .

Если измеренное значение угла ввода луча не соответствует требуемому, то преобразователь должен быть сдан в ремонт. **Хранить неисправные преобразователи в комплекте дефектоскопа запрещается!**

## 6.5. Определение «мертвой» зоны

Под «мертвой» зоной понимают область контролируемого изделия, прилегающую к контактной поверхности, дефекты в которой не выявляются при заданной условной чувствительности дефектоскопа с преобразователем.

«Мертвая» зона при контроле наклонным ПЭП обуславливается в основном:

- уровнем реверберационных шумов в призме ПЭП;
- согласованностью акустических сопротивлений материала призмы и контролируемого металла;
- длительностью зондирующего импульса;
- настройкой приемного тракта дефектоскопа.
- Величину «мертвой» зоны определяют минимальной глубиной расположения цилиндрического отверстия диаметром 2 мм, выполненного в СО-2 или в СО-3Р.
- Например, при контроле сварных стыков рельсов «мертвая» зона не должна превышать:
  - для ПЭП с  $\alpha - 65^\circ - 3$  мм;
  - для ПЭП с  $\alpha - 50^\circ - 8$  мм.
- Требования к «мертвой» зоне и условной чувствительности

должны выполняться при одних и тех же положениях органов регулировки «**Чувствительность**» и «**ВРЧ**» дефектоскопа.

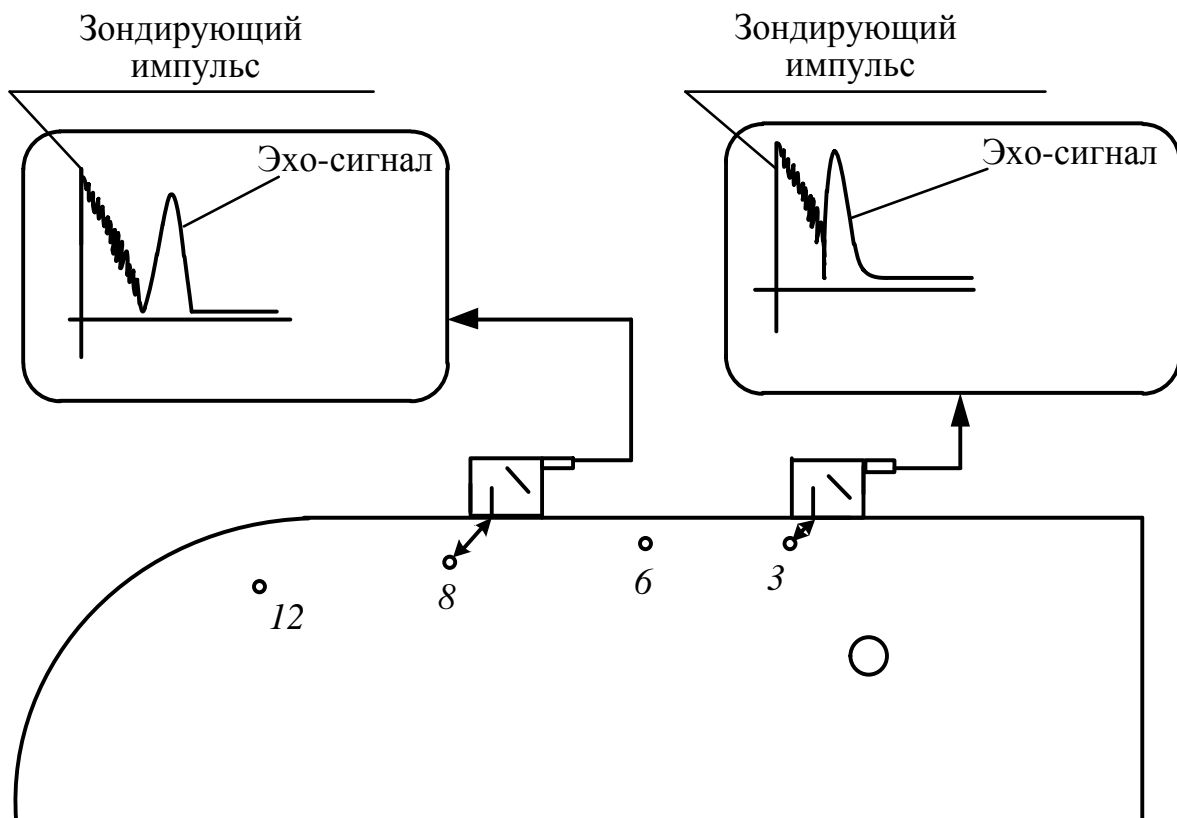


Рисунок 6.9 – Проверка «мертвой» зоны на СО-3Р:

А – эхо-сигнал от отверстия на глубине 3 мм сливается с зондирующим импульсом,  $M > 3$  мм; Б – эхо-сигнал от отверстия на глубине 8 мм наблюдается отдельно от зондирующего импульса,  $M < 8$  мм

## 6.6. Точность работы глубиномера

**Точность работы глубиномера** оценивается погрешностью измерения известного интервала времени между двумя донными эхо-сигналами.

Точность работы глубиномера дефектоскопа проверяют по стандартным образцам СО-1, СО-2 или СО-3Р измерением интервалов времени между донными эхо- сигналами при прозвучивании образца прямым преобразователем в направлении, указанном стрелкой «20 мкс»

Точность работы глубиномера считают удовлетворительной, если измеренные при помощи глубиномера по шкале «мкс» интервалы между донными эхо-сигналами составляют  $20 \pm 2$  (рис. 6.10).

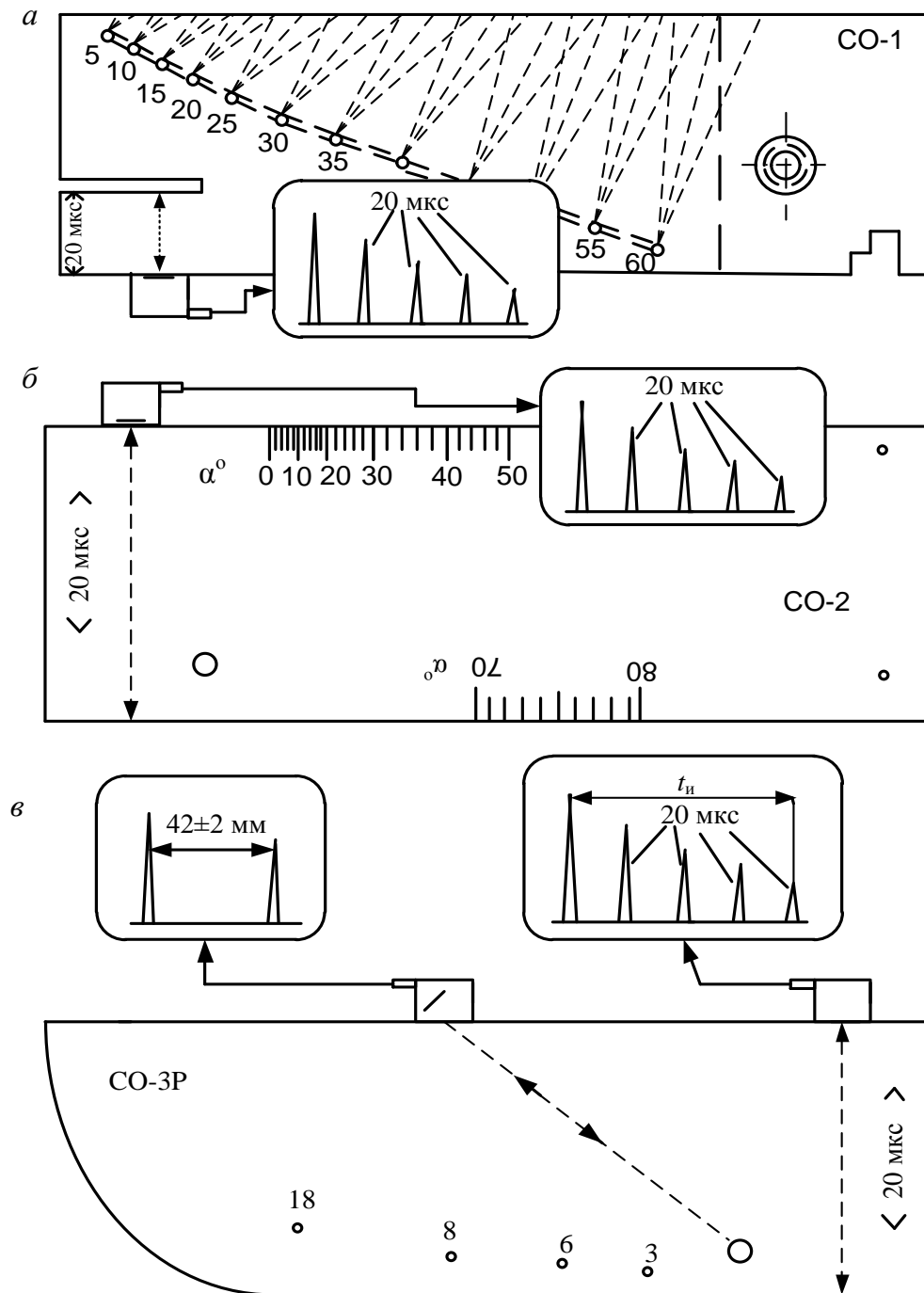


Рисунок 6.10 – Проверка точности работы глубиномера дефектоскопа:

*a* и *б* – с помощью прямого ПЭП ( $\alpha = 0^\circ$ ) на СО-1 (*a*) и на СО-2 (*б*);  
*в* – с помощью наклонного ПЭП ( $\alpha = 40-70^\circ$ ) на СО-3Р.  
 Изменения на СО-2 – аналогичны

Обычно с СО-1 фиксируют не менее двух ( $n = 2$ ) эхо-сигналов от прорези, а по СО-2(Р) или СО-3Р – не менее пяти ( $n = 5$ ) эхо-сигналов.

Погрешность глубиномера (в процентах) вычисляется по формуле

$$A_r = \left[ \frac{(t_n - 20 \cdot n)}{20 \cdot n} \right] \cdot 100\%, \quad (6.1)$$

где  $t_n$  – время прохождения от зондирующего до последнего импульса в образце.

Точность работы глубиномера дефектоскопа с наклонным ПЭП проверяют по стандартному образцу СО-2 (или СО-3Р) путем выявления наклонным преобразователем отверстия диаметром 6 мм. Точность работы глубиномера считают удовлетворительной, если измеренное при помощи преобразователя ( $\alpha = 40\text{--}65^\circ$ ) значение координаты глубины залегания составляет  $H = 42 \pm 2$  мм (рис. 6.10, в).

## 6.7. Условная чувствительность

Цель настройки **чувствительности** – установление такого усиления в акустическом тракте дефектоскопа, которое обеспечивает надежную регистрацию эхо-сигналов от дефектов минимально допустимого для данного изделия размера (устанавливается НДТ на контроль).

Под **условной чувствительностью** дефектоскопа с преобразователем понимают чувствительность, характеризуемую размерами и глубиной залегания выявляемых искусственных отражателей, выполненных в образце из материала с определенными акустическими свойствами.

Длительность зондирующего импульса  $\tau$  определяет длительность эхо-сигнала от дефекта и влияет на число интерферирующих между собой отдельных эхо-сигналов от отражателя с диффузной поверхностью. Естественно, это сказывается на реальной чувствительности контроля. Длительность импульса измеряется на установке, предназначенной для

определения частоты (см. рис. 2.6, 2.7). Длительность эхо-сигнала

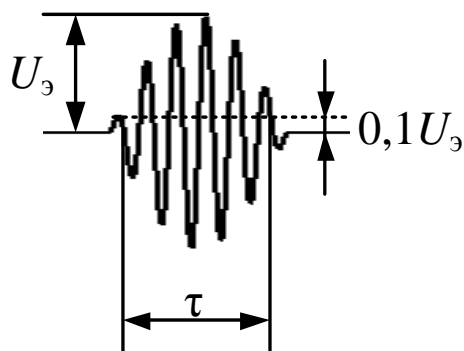


Рисунок 6.11 – Изображение длительности зондирующего импульса

измеряют на уровне  $0,1$  от амплитуды импульса. Чем больше длительность зондирующего импульса, тем больше «мертвая» зона и хуже разрешающая способность дефектоскопа (рис. 6.11). С другой стороны, при слишком коротком импульсе мощность излучаемых колебаний недостаточна и как следствие глубина прозвучивания изделия и чувствительность контроля – малы.

Так же, как и частота  $f$  ультразвуковых колебаний, длительность зондирующего импульса  $\tau$  в основном проверяется только в условиях дорожной лаборатории дефектоскопии через каждые 6 месяцев.

### Контрольные вопросы

1. В чем разница между стандартными образцами СО-1, СО-2 и СО-3?
2. Как происходит определение точки выхода наклонного луча ПЭП?
3. Как происходит определение угла ввода луча ПЭП?
4. Как происходит определение «мертвой» зоны?
5. Чем оценивается точность работы глубиномера?
6. Что такое условная чувствительность дефектоскопа?



## **РАЗДЕЛ 7. ОСНОВЫ РАБОТЫ С УЛЬТРАЗВУКОВЫМ ДЕФЕКТОСКОПОМ ТИПА УД2-12**

### **7.1. Инструкция по соблюдению техники безопасности и охраны труда**

Правила техники безопасности при контроле конкретного объекта должны быть сформулированы в документах, действующих на предприятии. Следует учитывать, в частности, следующие положения:

- при напряжении питания свыше 40 В необходимо применять заземление;
- при контроле объектов изнутри, например внутри сосудов, напряжение питания должно быть не выше 12 В;
- ультразвуковой контроль необходимо выполнять при температурах не ниже + 5°C и не выше 45°C. Эти пределы могут быть расширены ведомственными постановлениями при обеспечении технических и физиологических возможностей;
- работа на высоте допускается только при использовании предохранительных поясов;
- общая освещенность должна быть в пределах 100–200 люкс.

Специфические требования к противопожарной безопасности относятся к контактной жидкости, если она обладает повышенной возгораемостью (например, некоторые типы масел, спиртов). Их следует предохранять от воздействия огня, искрящихся электроконтактов.

Прямого воздействия ультразвука с параметрами, используемыми при контроле металлов, на здоровье дефектоскопистов не обнаружено. Интенсивность используемого излучения в сотни раз меньше, чем предусмотрено требованиями ГОСТ 23667-85 «Контроль неразрушающий. Дефектоскопы ультразвуковые. Методы измерения основных параметров». Тем не менее, в качестве средства профилактики следует избегать прямой контактной передачи УЗ на руки работающих. Рекомендовано работать в нитяных перчатках.

Подготовка к работе дефектоскопа требует обеспечить его

заземление, для чего гибким проводом соединяют шину защитного заземления помещения с клеммой «Корпус» на задней панели прибора. Кроме того, необходимо убедиться в наличии предохранителей в держателях на задней панели дефектоскопа. После выполнения этих операций кабель питания подключают к источнику сетевого напряжения, а кабель с преобразователем – к выходному и входному разъемам дефектоскопа, расположенным на передней панели. Перед работой с дефектоскопом необходимо усвоить назначение, обозначение и расположение основных органов управления, которые находятся на передней и верхней панелях. Органы управления выполнены в виде кнопок, потенциометров с осями, снабженных ручками и торцевыми прорезями «под шлиц».

## 7.2. Техническая характеристика ультразвукового дефектоскопа типа УД2-12

Конструктивно дефектоскоп выполнен в виде десяти блоков (табл. 7.1), каркаса и съемных верхнего и нижнего кожухов (рис. 7.1).

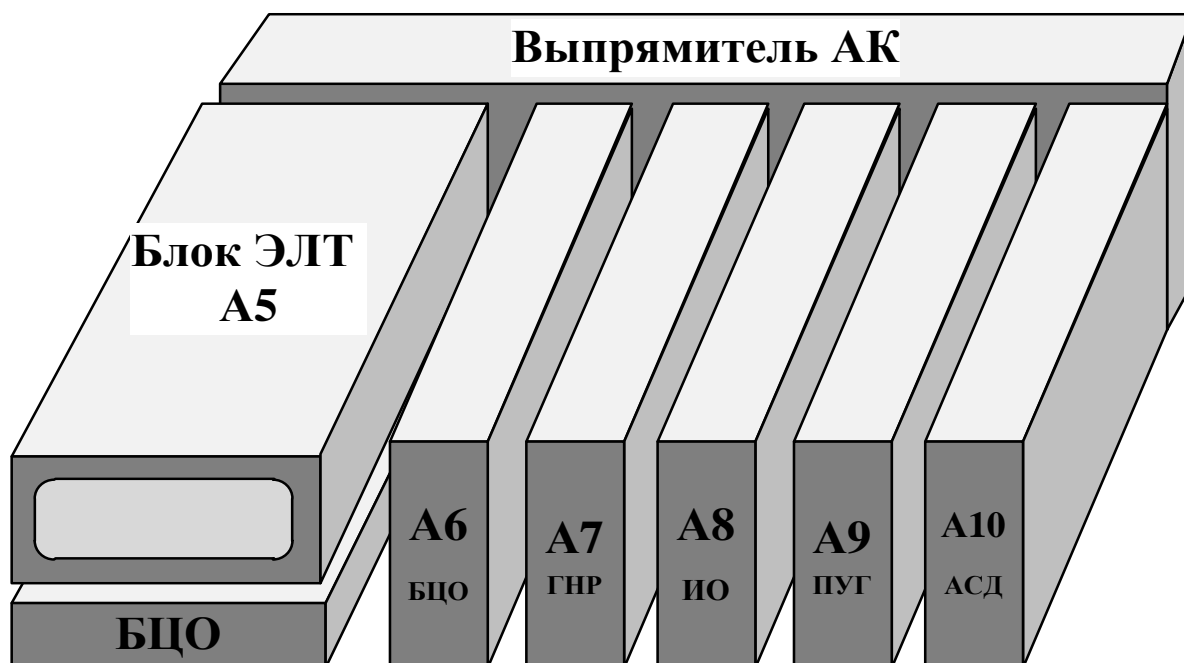


Рисунок 7.1 – Конструкция дефектоскопа

Таблица 7.1 – Основные блоки дефектоскопа

Блок	Обозначение на ВП	Функциональные узлы, содержащиеся в блоке и не отраженные в его названии
Блок цифрового отсчета (БЦО)	–	–
Блок электронно-лучевой трубки (ЭЛТ)	A5	Калибратор глубиномера (часть)
Блок развертки (БР) или генератор напряжения развертки	A6	Калибратор глубиномера (часть), БЦО (часть)
Генератор импульсов возбуждения (ГИВ), генератор зондирующих импульсов (ГЗИ)	A7	–
Измеритель отношений (ИО)	A8	ВРЧ
Устройство приемное (УП), приемно-усилительный тракт (ПУТ)	A9	Компенсированная отсечка
Блок автоматического сигнализатора дефектов (АСД)	A10	–
Выпрямитель (может быть заменен аккумулятором)	–	–
Стабилизатор напряжения	–	Преобразователь напряжения (часть); генератор синхронизирующих импульсов
Преобразователь	–	–

Вставленные в разъемы коммутационные блоки А5–А10 плотно прилегают друг к другу и образуют пульт управления, на верхнюю панель (ВП) дефектоскопа выведены *настроечные органы* управления, а на переднюю панель (ПП) (с помощью легкоъемных ручек и кнопок) – основные *оперативные органы* управления (рис. 7.2): 1 – сенсорный переключатель режима БЦО; 2, 3 – кнопки «Накал» и «Работа» (сначала нажимается кнопка «Накал», через пару минут кнопка «Работа»); 4 – кнопки аттенюатора для ввода соответствующего ослабления; 5 – ручка для ручного стробирования сигнала на экране ЭЛТ; 6 – экран ЭЛТ;

7 – цифровой индикатор БЦО; 8 – индикатор «Накал»; 9 – индикатор режима БЦО; 10 – световой индикатор АСД: I – красная, II – желтая, III – зеленая лампы; 11 и 12 – выходной и входной разъемы дефектоскопа для подключения ПЭП.

На задней стенке панели (рис. 7.3) размещены кнопки установки частоты внутренней синхронизации (125 или 500 Гц); кнопка «×2», при нажатии которой данные частоты увеличиваются вдвое (250 или 1000 Гц); кнопка переключения режима синхронизации «Внеш. / Внутр.»; разъемы выхода и входа внешней синхронизации; клемма заземления и плавкие вставки.

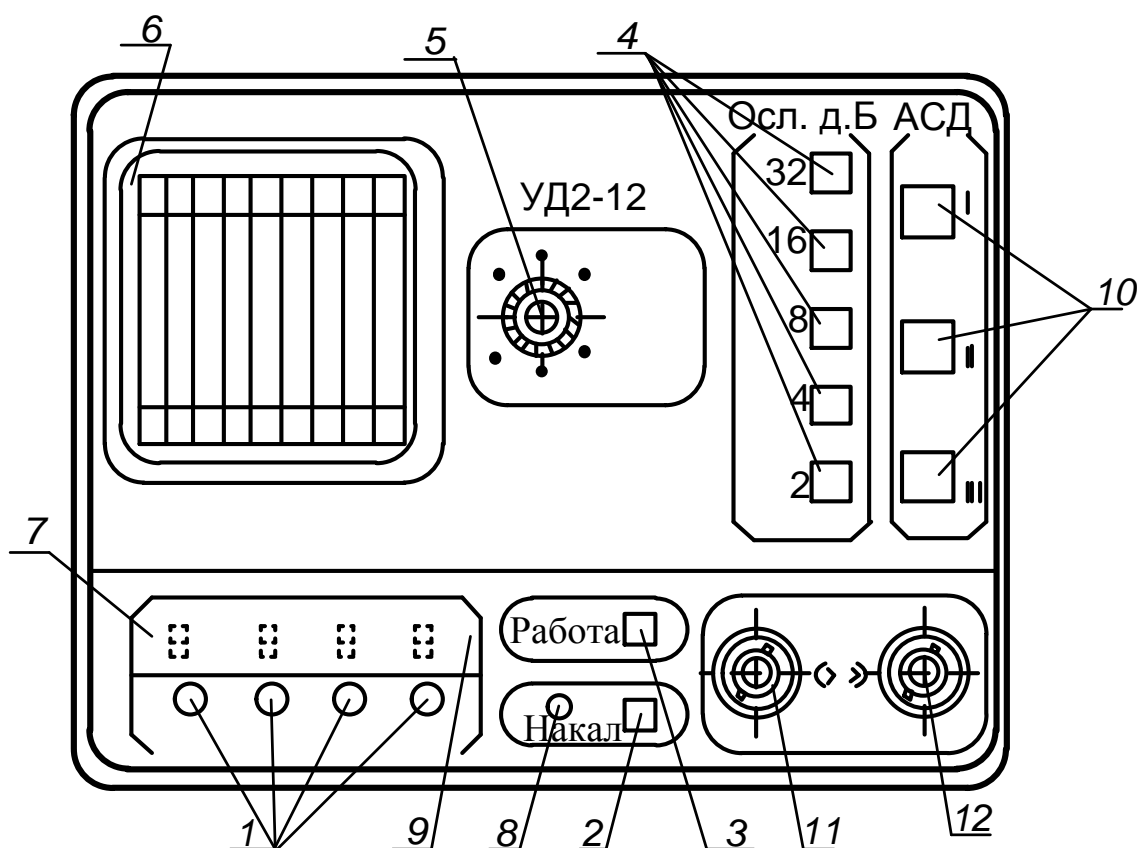


Рисунок 7.2 – Передняя панель дефектоскопа УД2-12

По конструктивному исполнению дефектоскоп УД2-12 относится к переносным приборам. Комплектуется он тринадцатью пьезоэлектрическими преобразователями (ПЭП) конструкции «Приз», среди которых есть прямые и наклонные ПЭП с углами ввода  $\alpha = 40, 50, 65$  и  $70^\circ$ , работающие на частотах 1,25; 1,8; 2,5; 5,0; 10,0 МГц. Дефектоскоп УД2-12 способен прозвучивать объект контроля на глубину до 5 м,

обеспечивает чувствительность до 102 дБ. Все это позволяет обнаруживать дефекты типа нарушения сплошности, измерять глубину и координаты их залегания.

Дефектоскоп УД2-12 является прибором общего назначения (в маркировке дефектоскопа нет буквы «С»). В маркировке первая цифра «2» указывает на то, что прибор относится к дефектоскопам второй группы сложности, следовательно, в нем реализованы следующие функции: фиксация наличия дефекта, измерение амплитуды отраженного сигнала, определение координат отражателя. Кроме того, при определенной настройке можно определять по блоку цифрового отсчета эквивалентную площадь дефекта (т. е. выполняется функция приборов третьей группы сложности).

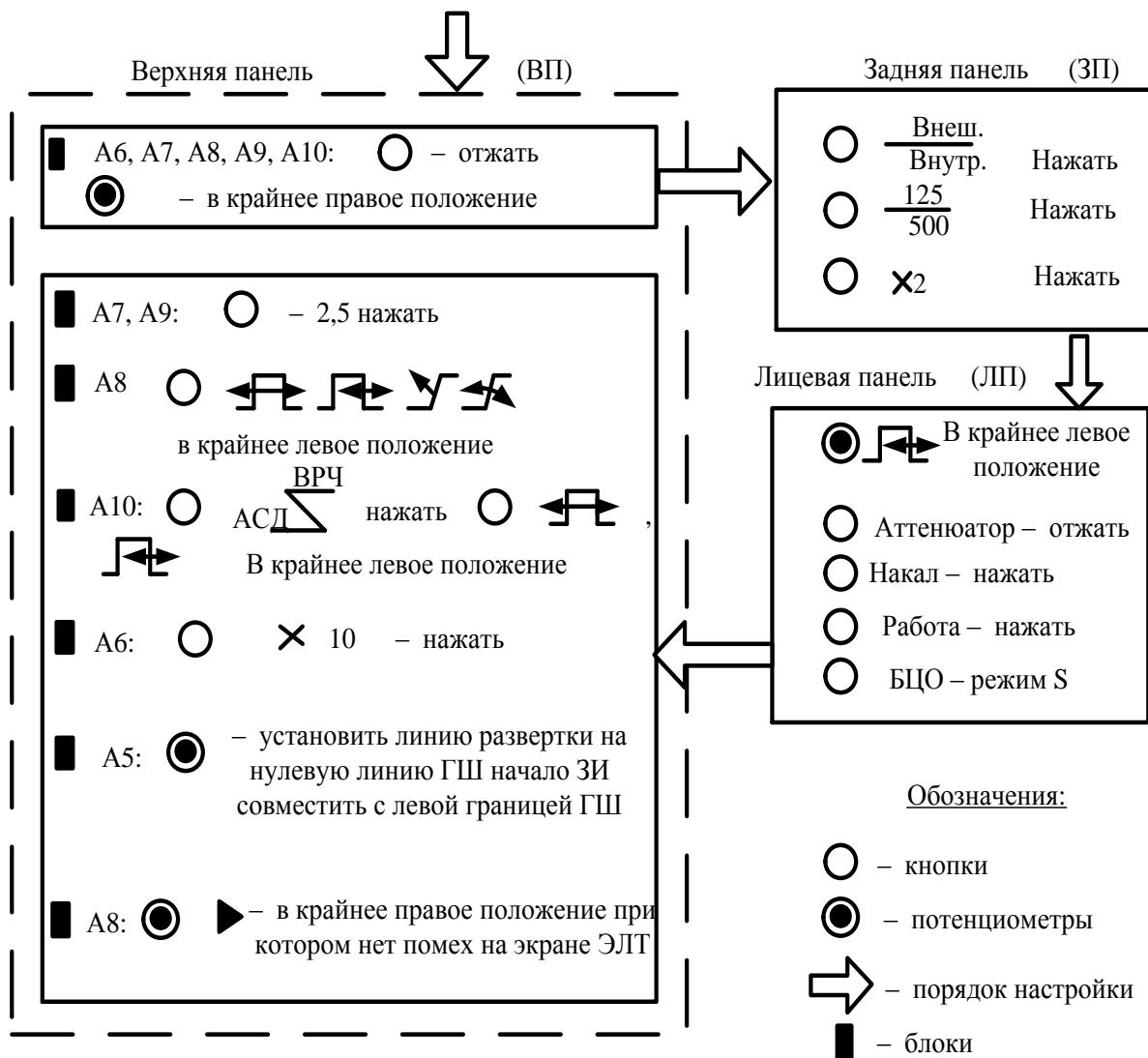


Рисунок 7.3 – Технологическая карта настройки дефектоскопа

На практике для ультразвукового контроля деталей вагонов используются специализированные приборы. Они проще в эксплуатации, не требуют высокой квалификации операторов-дефектоскопистов. Наиболее полно возможности дефектоскопа УД2-12 для контроля различных ОК с сохранением относительной простоты их использования реализуются с помощью технологических карт настройки. Например, на рис. 7.3 приведена технологическая карта для настройки УД2-12 при контроле осей, которая дает возможность дефектоскописту зафиксировать положение органов управления дефектоскопа (один раз в смену, перед началом контроля и пр.) и использовать затем дефектоскоп как «специализированный».

Функциональная схема дефектоскопа приведена на рис. 7.4, на ней показаны основные блоки: генератор синхронизирующих импульсов (ГСИ), генератор зондирующих импульсов (ГЗИ), приемно-усилительный тракт (ПУТ), генератор напряжения развертки (ГНР), блок электронно-лучевой трубки, блок временной регулировки чувствительности (ВЧР), автоматический сигнализатор дефектов, блок цифрового отсчета, включающий в себя блок отношений, глубиномер, дополнительный индикатор.

В свою очередь, ПУТ содержит последовательно соединенные диодный ограничитель, аттенюатор, усилитель высокой частоты (УВЧ), амплитудный детектор (АД) и видеоусилитель (ВУ). Дефектоскоп реализует эхо-метод, теневой и зеркально-теневой методы. На схеме также обозначены кнопки и ручки потенциометров настроечных органов управления ВП.

*Работа дефектоскопа.* Диаграммы напряжений в основных точках дефектоскопа показаны на рис. 7.5.

Генератор синхронизирующих импульсов обеспечивает синхронизацию работы узлов дефектоскопа, реализуя импульсный режим излучения-приема ультразвуковых колебаний. Он фактически управляет работой ГЗИ, ВРЧ, ГНР, АСД и глубиномера, обеспечивая своими синхроимпульсами их запуск. ГСИ может работать в режиме самовозбуждения (внутренняя синхронизация) или внешнего запуска. Частота внутренней синхронизации может устанавливаться на 125, 250,

500, 100 Гц. Наиболее часто ГСИ используют в режиме самовозбуждения.

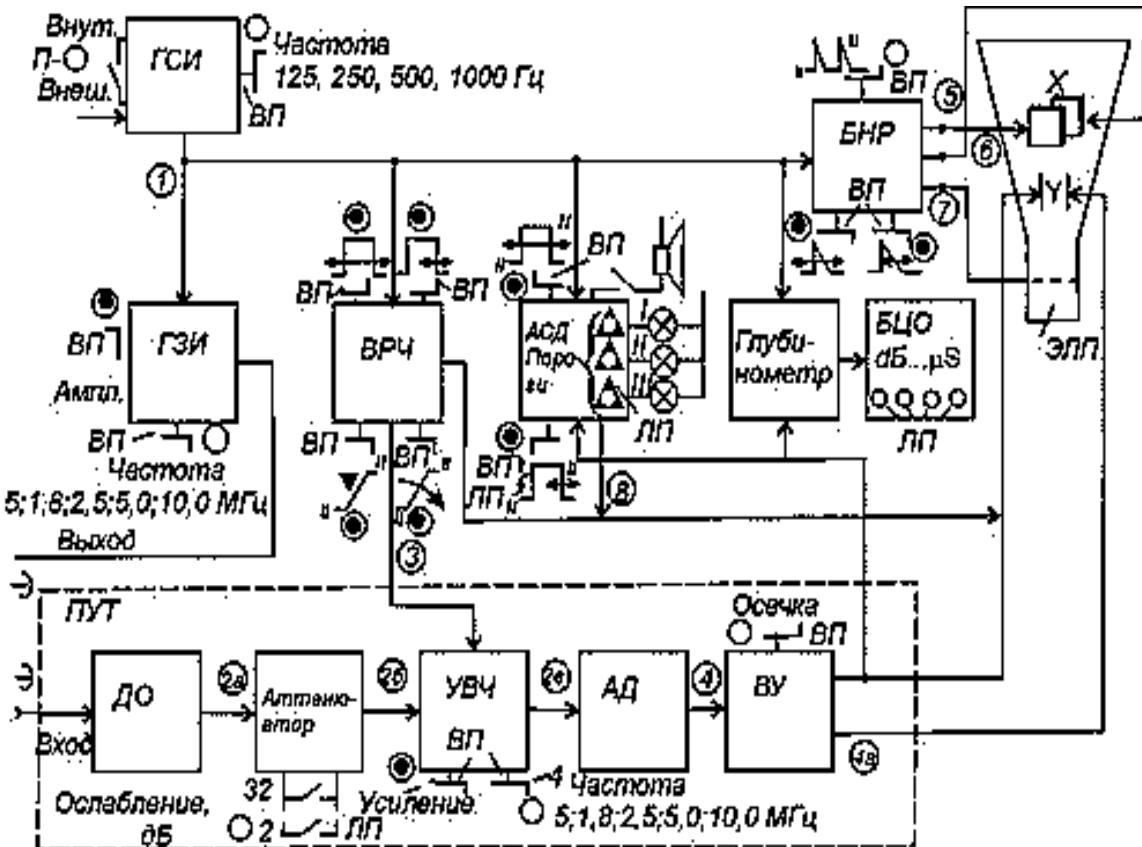


Рисунок 7.4 – Функциональная схема дефектоскопа

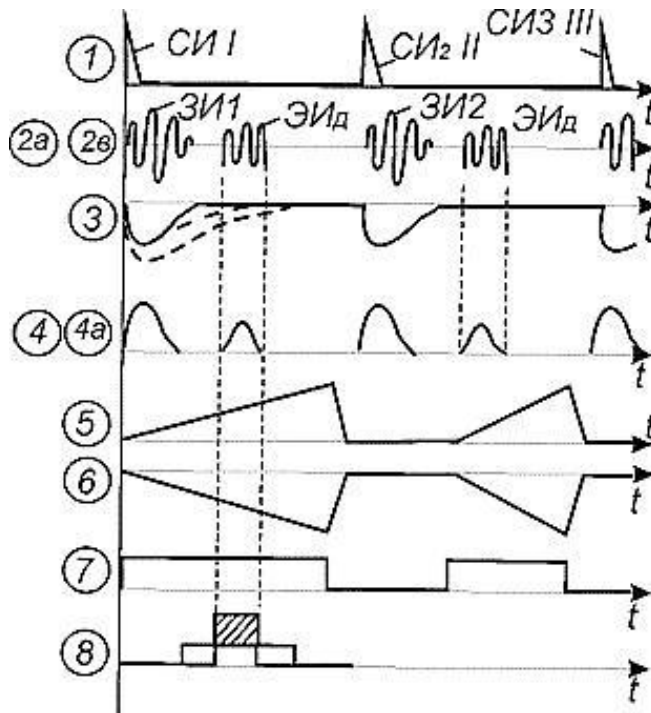


Рисунок 7.5 – Диаграммы напряжений

Частота ГСИ ограничивается сверху условием полного затухания всех принимаемых сигналов в периоде между соседними ЗИ, снизу – скоростью сканирования ПЭП.

Генератор зондирующих импульсов вырабатывает ЗИ высокочастотных электрических колебаний для возбуждения пьезопластины ПЭП. Форма огибающей ЗИ квазикоколообразная (рис. 7.6). Длительность зондирующего импульса ограничивается снизу условием сохранения спектральных свойств, т.е. должно иметься хотя бы несколько периодов (примерно 10 колебаний) с требуемой частотой. Но с точки зрения уменьшения «мертвой» зоны и улучшения разрешающей способности длительность ЗИ должна быть как можно меньше. Однако при этом уменьшается излучаемая в ОК энергия. Длительность ЗИ в дефектоскопе УД2-12 находится в пределах 4–6 мкс. Если при этом работать на частоте ультразвуковых колебаний 2,5 МГц, то в импульсе укладывается порядка 10 колебаний. Амплитуда ЗИ находится в пределах 180–300 В.

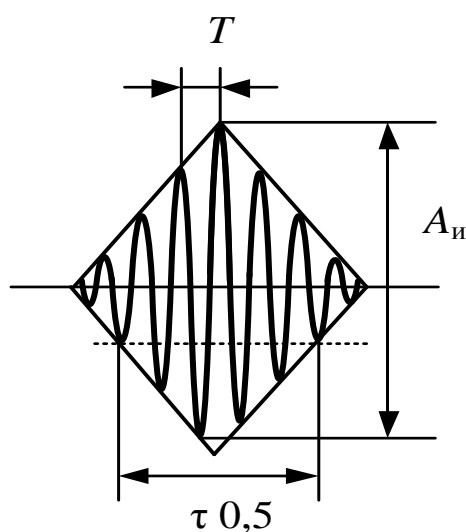


Рисунок 7.6 – Форма зондирующих импульсов

Импульсы высокочастотных электрических колебаний с выхода ГЗИ поступают на контактные площадки пьезопластины ПЭП, которая в результате обратного пьезоэффекта преобразует их в механические. Последние при наличии акустического контакта распространяются в ОК. Дойдя до границы с какой-либо инородной средой, механические колебания переотражаются, попадают на пьезопластину ПЭП и преобразуются ею в импульсы высокочастотных

электрических колебаний, которые далее поступают на вход ПУТ дефектоскопа.

Рассмотрим работу приемно-усилительного тракта. В практике контроля деталей вагонов в основном применяют совмещенный режим работы ПЭП, который излучает и принимает колебания. При этом в процессе



излучения с ГЗИ на ПП поступает напряжение в десятки и сотни вольт. Оно может попасть на вход ПУТ и вывести последний из строя, поэтому на его входе устанавливают ограничитель, как правило, диодный, который ограничивает уровень электрического сигнала с ГЗИ на входе ПУТ до 1 В, а во время приема пропускает сигналы с ПП порядка десятков и сотен микровольт.

Приемно-усилительный тракт (ПУТ) предназначен для усиления и детектирования сигналов, регистрируемых ПЭП (от сотен микровольт до единиц и десятков милливольт).

Сигнал при приеме через диодный ограничитель поступает на вход аттенюатора. Аттенюатор представляет собой калиброванный делитель кнопочного типа. Шаг изменения – 2 дБ. Сумма децибел по нажатым кнопкам есть общее ослабление сигнала, которое позволяет сравнивать в децибелах уровни эхо-сигналов от различных отражателей и используется, что очень важно, для настройки чувствительности дефектоскопа и измерения амплитуды принятых сигналов. Причем амплитуда сигнала является информационным признаком дефекта.

Усилитель высокой частоты (УВЧ) предназначен для усиления высокочастотных импульсов колебаний до напряжения, при котором можно проводить детектирование (не менее 1В). Регулятор «Усиление» может менять усиление УВЧ на 46 дБ. Он широкополосный и работает на всех частотах, генерируемых генератором зондирующих импульсов (ГЗИ).

Временная регулировка чувствительности (ВРЧ) позволяет изменять во времени коэффициент усиления УВЧ. Для этого им вырабатывается управляющее напряжение с участком экспоненциально возрастающей формы. Это дает возможность сократить время восстановления УВЧ после перегрузки его с ЗИ (т. е. подавить ЗИ или убрать шумы ПЭП) и тем самым уменьшить мертвую зону; компенсировать в определенной степени ослабление ультразвука в ОК, обусловленное расхождением луча, а следовательно, и его затуханием (т. е. выровнять чувствительность по глубине ОК). Временная регулировка чувствительности должна быть либо настроена, либо выключена.

Амплитудный детектор (АД) преобразует высокочастотный сигнал электрических колебаний в видеоимпульсный сигнал. Это позволяет

улучшить качество изображения на экране ЭЛТ и упростить дальнейшую обработку сигнала. Амплитудный детектор – это последовательная совокупность выпрямителя и сглаживающего фильтра. В результате детектирования формируется однополярная огибающая.


Видеоусилитель (ВУ) производит дальнейшее усиление принятого сигнала до напряжения, необходимого для наблюдения его на экране УД2-12, и дополнительно выполняет функцию подавления шумов, которая реализована в виде схемы компенсированной отсечки, т. е. отсечки с сохранением уровня полезного сигнала. При этом сигналы, превышающие определенный уровень, поступают на экран без подавления. Сигналы ниже уровня отсечки (шумы) могут быть частично или полностью подавлены. Такая отсечка позволяет корректно сравнивать амплитуды сигналов между собой. Устанавливать большой уровень отсечки не рекомендуется, так как наряду с шумами можно подавить и полезный сигнал.

В электронно-лучевой трубке в результате термоэлектрической эмиссии с катода испускается поток электронов. Благодаря модулятору и ускоряющим электродам поток электронов фокусируется в луч, устремляющийся через две пары взаимно перпендикулярных пластин к экрану. Система отклонения луча здесь электростатическая. Внутренняя поверхность экрана покрыта люминофором – веществом, способным светиться при соударении с ним потока электронов. На экране ЭЛТ в определенном масштабе воспроизводится процесс распространения ультразвуковых колебаний в ОК. Для этого вертикально отклоняющие пластины подключаются к выходу ПУТ, т. е. к выходу ВУ. На горизонтально отклоняющие пластины подаются пилообразные напряжения противоположных полярностей, вырабатываемых ГНР.

Строгая линейность прямого хода луча определяет равномерный масштаб развертки на экране по горизонтали. Для исключения наблюдения обратного хода луча ГНР формирует импульс подсвета, подаваемого на модулятор ЭЛТ. Длительность этого импульса равна длительности прямого хода луча, которая, в свою очередь, определяет размеры зоны контроля, т. е. толщину того участка ОК, где могут быть зарегистрированы эхо-сигналы от дефекта. Изменение длительности пилообразного напряжения обеих полярностей и импульса подсвета происходит синхронно. При этом

амплитуда пилообразного напряжения остается постоянной при любой длительности развертки.

В дефектоскопе УД2-12 реализованы два режима контроля: «от поверхности» (режим синхронного запуска развертки) и «по слоям» (режим задержанной развертки). Режим по слоям целесообразно применять при контроле деталей, например оси КП, так как в режиме от поверхности масштаб изображения по горизонтали на экране может оказаться слишком мелким, что не позволит отдельно наблюдать близко расположенные отражатели.

Автоматический сигнализатор дефекта (АСД) производит временную и амплитудную селекцию поступающих с выхода ПУТ сигналов и осуществляет управление дополнительными встроенными индикаторами: звуковым и световым. Временная (т. е. по толщине ОК) селекция необходима для того, чтобы на дополнительные индикаторы не поступали ЗИ, а также эхо-сигналы от отражателей вне зоны контроля. Для этого формируют строб-импульс, параметры которого можно изменять в определенных пределах. Амплитудная селекция необходима для того, чтобы дополнительные индикаторы срабатывали только в том случае, если застробированные сигналы превышают определенный уровень (для эхо-метода) или становятся меньше данного уровня (для теневого и зеркально-теневого методов). В УД2-12 формируется три порога АСД, и к ним привязаны три индикаторные лампы: зеленая – нижний, желтая – средний, красная – верхний пороги срабатывания АСД. Уровни порогов регулируются по высоте экрана, ненужные пороги можно «загнать» вверх за экран. В практике приняты два порога чувствительности: поиска и оценки, которые можно привязать к каким-либо двум из названных индикаторных ламп, обычно красной и зеленой. При работе с использованием эхо-метода горит всегда только одна индикаторная лампа. Звуковой индикатор возбуждается только тогда, когда горит зеленый индикатор и нажата кнопка «» на блоке А10, а также в течение некоторого времени после отжатия этой кнопки или отключения зеленой лампы. Такая работа звукового индикатора исключает пропуск изменения сигнала по амплитуде нижнего уровня порога срабатывания, даже если зеленая лампа включалась на очень короткое время, и дефектоскопист

зрительно не зафиксировал ее включение. При превышении желтого или красного уровня звуковой индикатор не работает. При теневом или зеркально-теневом методе звуковой индикатор не возбуждается до тех пор, пока есть превышение всех уровней, но если амплитуда станет ниже зеленого, то он возбуждается.

Глубиномер основан на измерении времени распространения ультразвуковых колебаний от момента излучения ЗИ до момента приема отраженного сигнала с пересчетом в требуемую координату. В дефектоскопе УД2-12 измерение этого времени происходит автоматически. При контроле осей колесных пар вагонов глубиномер не используется, так как зона контроля может быть определена по эхо-сигналам от характерных отражателей (например, галтелей и торцов осей, кромок напрессованных деталей и т. п.), координаты которых известны из конфигурации и геометрии оси.

Генератор напряжения развертки (ГНР) вырабатывает два пилообразных напряжения противоположных полярностей и импульс подсвета, выходы для которых физически разделены. Импульс подсвета поступает на модулятор ЭЛТ, а пилообразное напряжение – каждое на свою горизонтально отклоняющую пластину.

### **Контрольные вопросы**

1. Какие основные блоки дефектоскопа?
2. Какое назначение генераторов зондирующих и синхронизирующих импульсов?
3. Как происходит излучение и прием акустических импульсов?
4. Назовите назначение таких блоков дефектоскопа как:
  - приемно-усилительного тракт;
  - усилитель высокой частоты;
  - временная регулировка чувствительности;
  - амплитудный детектор;
  - видеоусилитель дефектоскопа;
  - автоматический сигнализатор дефектов;
  - глубиномер;
  - генератор напряжения развертки.

## ЛАБОРАТОРНЫЕ РАБОТЫ

### Лабораторная работа 1

#### ОПРЕДЕЛЕНИЕ СКОРОСТИ РАСПРОСТРАНЕНИЯ УЛЬТРАЗВУКОВЫХ ВОЛН В ТВЕРДЫХ ТЕЛАХ

*Цель работы* – изучить параметры ультразвуковых колебаний (скорость ультразвука в различных материалах, время прохождения ультразвука в различных образцах) и экспериментально определить скорости продольной и поперечной волн в образцах из различных материалов.

*Аппаратура:* дефектоскоп ультразвуковой типа УД2-12; прямые пьезоэлектрические преобразователи (ПЭП) на частоту 2,5 МГц типа П111-2,5-К12-002; наклонные преобразователи на частоту 2,5 МГц с углом ввода  $\alpha = 50^\circ$  (П121-2,5-50°-002); кабели к ПЭП.

*Образцы:* стандартный образец типа СО-3; лабораторные образцы из малоуглеродистой стали и оргстекла; минеральное масло, вода (для получения акустического контакта).

#### Краткие теоретические сведения

Измерение скорости ультразвуковых колебаний или ультразвука в образцах из различных материалов производят эхо-импульсным методом [1]. Скорость ультразвука при различных типах волн можно рассчитать по упругим константам материала среды, а именно: **по модулю упругости  $E$ , Н/м, плотности  $\rho$ , кг/м, и коэффициенту Пуассона  $\mu$**  (безразмерная величина) [2].

Так, скорость ультразвука определяется по следующим формулам:

а) для продольных волн

$$c_l = \sqrt{\frac{E}{\rho}} \cdot \sqrt{\frac{1-\mu}{(1+\mu) \cdot (1-\mu)}}, \quad (1.1)$$

б) для поперечных волн

$$c_t = \sqrt{\frac{E}{\rho}} \cdot \sqrt{\frac{1}{2(1+\mu)}}. \quad (1.2)$$

Однако определение скорости ультразвука по формулам (1.1) и (1.2) сводится к измерению значений  $E$ ,  $\rho$  и  $\mu$ , что требует больших трудозатрат и времени.

Эхо-импульсный метод позволяет определить скорости  $c_l$  и  $c_t$  экспериментальным способом. Волна, введенная в виде зондирующего импульса (ЗИ) ультразвуковых колебаний в какую-либо деталь, дойдя до внутренних отражателей (несплошности, грани поверхностей), в общем случае будет отражаться в виде эхо-импульса (ЭИ) колебаний.

При глубине залегания отражателя  $H$  и времени прохождения волны  $\tau$  от точки ввода в деталь до отражателя и обратно скорости волн продольной  $c_l$  и поперечной  $c_t$  (рис. 1.1) определяются по формулам:

а) для продольной волны  $c_l$

$$c_l = \frac{2H}{\tau - 2t_n}, \quad (1.3)$$

б) поперечной волны  $c_t$  (рис. 1.2)

$$c_t = \frac{2H}{(\tau - 2t_n) \cos \alpha}, \quad (1.4)$$

где  $2t_n$  – время прохождения импульса ультразвука через призму ПЭП в обоих направлениях (акустическая задержка);  $\alpha$  – угол ввода луча в среду.

Формулы (1.3) и (1.4) положены в основу способа косвенного измерения скоростей  $c_l$  и  $c_t$  в различных образцах. Для определения скоростей  $c_l$  и  $c_t$  требуется измерить глубину  $H$ , время  $\tau$ , знать или измерить или компенсировать значение времени  $2t_n$  и угол  $\alpha$ .

Акустическая задержка  $2t_n$  при измерении скорости  $c_l$  мала, поэтому ею можно пренебречь. Однако при некоторых способах измерения скорости  $c_t$  она может быть соизмерима со временем  $\tau$  и ею нельзя пренебрегать. Очевидно, что в любом случае косвенное определение скорости будет приближенным.

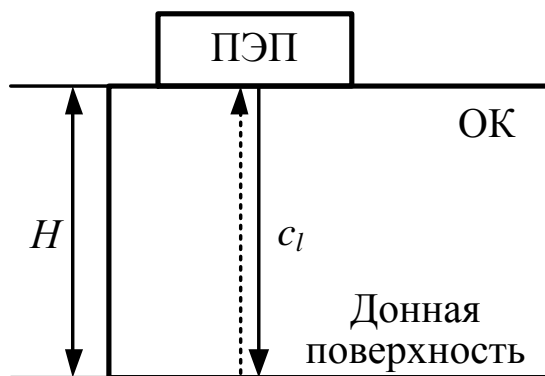


Рисунок 1.1 – Схема прохождения продольной волны в объекте контроля

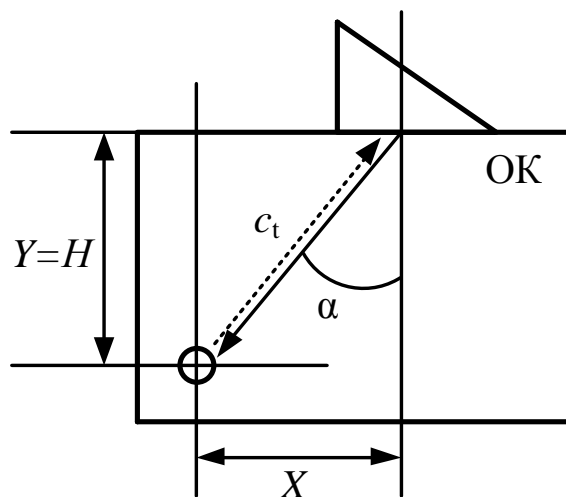


Рисунок 1.2 – Схема прохождения сдвиговой волны в объекте контроля

***Способ косвенного измерения скорости продольной волны  $c_l$  в образцах с плоскопараллельными гранями***

Скорость  $c_l$  косвенным способом можно измерить путем многократного замера отражений от донной поверхности ультразвуковых волн, излучаемых прямым ПЭП, установленным на противоположную грань образца (рис. 1.3, а) [2].

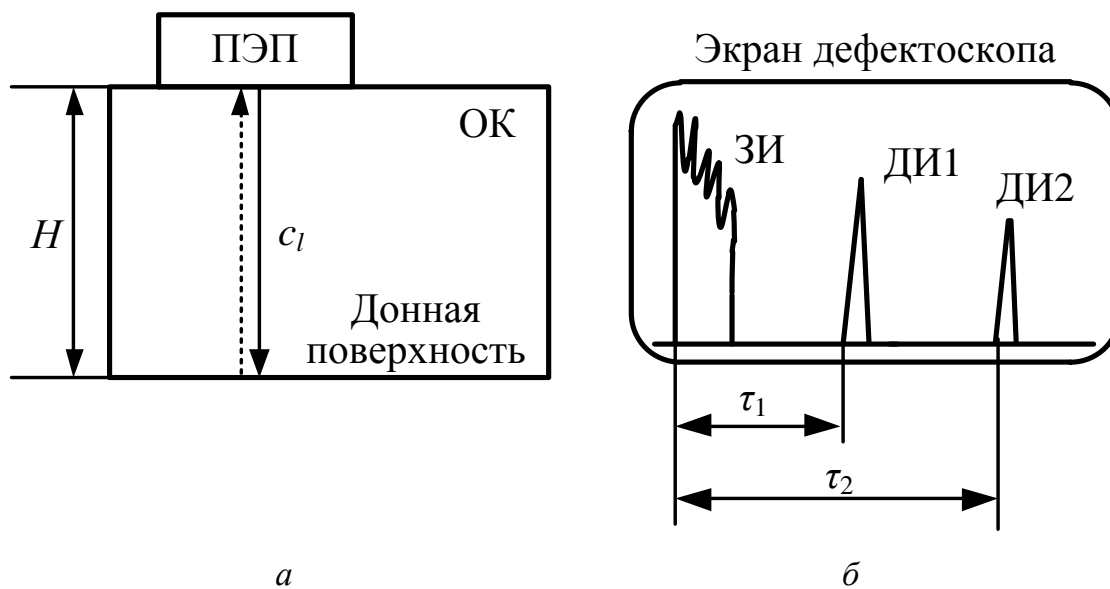


Рисунок 1.3 – Схема определения скорости продольной волны с помощью прямого ПЭП: ЗИ – зондирующий импульс; ДИ1, ДИ2 – первый и второй донные импульсы соответственно

Применив формулу (1.3) для первого и второго донных импульсов (ДИ), получаем:

$$c_l = \frac{2H}{(\tau_2 - 2t_n) - (\tau_1 - 2t_n)} = \frac{2H}{\tau_2 - \tau_1}. \quad (1.5)$$

Из уравнения (1.5) следует, что искомую величину  $c_l$  можно определить, измерив величину временных интервалов  $\tau_1$  и  $\tau_2$  от зондирующего импульса до первого и второго донных эхо-сигналов, полученных на экране дефектоскопа (рис.1.3).

Указанные действия на дефектоскопе УД2-12 выполняются блоком цифрового отсчета (БЦО) в режиме  $\mu S$ , с использованием строба автоматической сигнализации дефекта (АСД) и (или) ручного стробирования. Преобразованное уравнение (1.5) показывает, что в данном случае определения времени  $2t_n$  не требуется, поэтому регулятор «0» (ушастый нуль) на блоке А6 при измерении временных интервалов  $\tau_1$  и  $\tau_2$  может находиться в любом положении (кроме крайних), которое удовлетворяет условию:  $\tau_1 > 2t_n$  (рис. 1.4, б). В противном случае БЦО не может определить временной интервал  $\tau_1$ , а иногда и  $\tau_2$ . В случае, если  $\tau_1 > 2t_{\max} = 30\text{--}35$  мкс, то указанное требование выполняется автоматически.

### ***Способы косвенного измерения скорости поперечной волны $c_t$ на различных образцах***

**Способ 1.** Используются полукруглый образец СО-3 радиусом  $R$  и отражатель – вогнутая поверхность. Схема прозвучивания представлена на рис. 1.4, а.

Скорость  $c_t$  можно определить, измерив временные интервалы  $\tau_1$  и  $\tau_2$  до первого и третьего отраженных эхо-сигналов на экране дефектоскопа (рис. 1.4, б). Соотношение для определения  $c_t$ , полученное на основе формулы (1.4), имеет вид

$$c_t = \frac{4R}{\tau_2^{\text{БЦО}} - \tau_1^{\text{БЦО}}}. \quad (1.6)$$



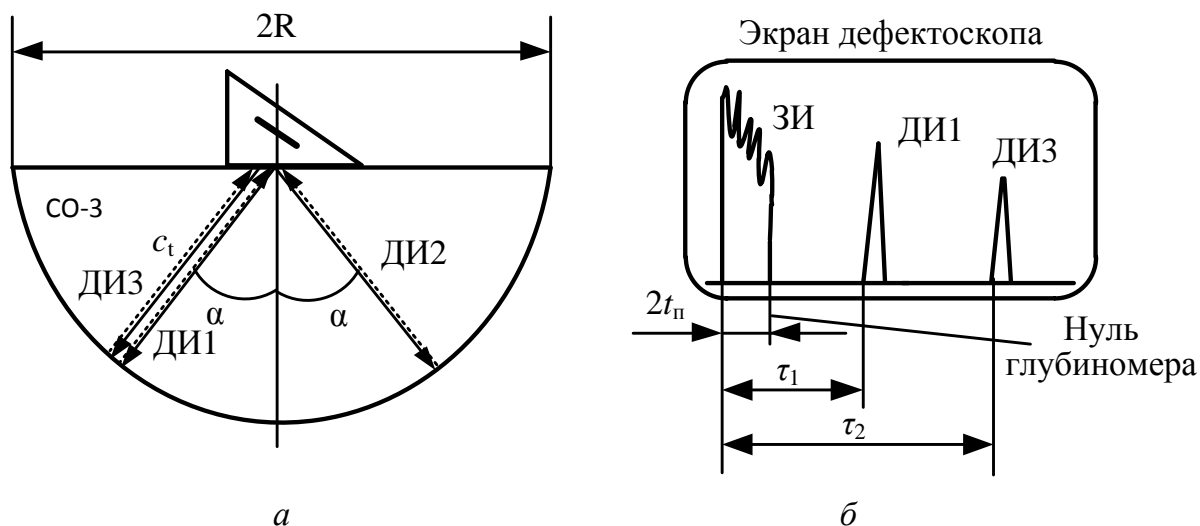


Рисунок 1.4 – Схема прозвучивания образца СО-3

**Способ 2.** Используются образец с плоскопараллельными гранями и отражатель – двугранный угол. Схема прозвучивания приведена на рис. 1.5, а.

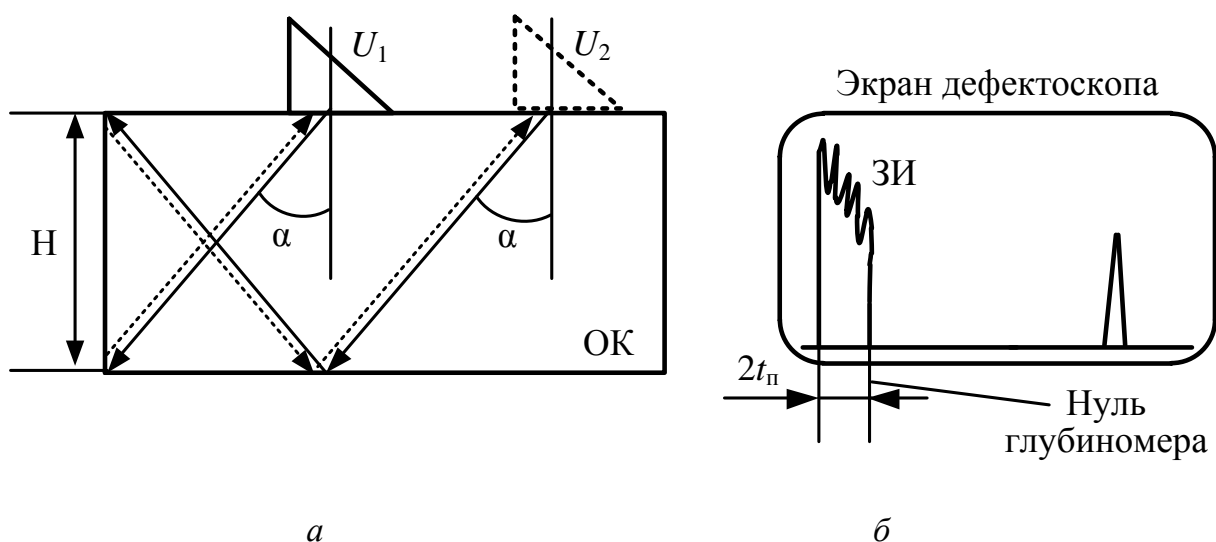


Рисунок 1.5 – Схема прозвучивания образца с плоскопараллельными гранями

В этом случае время  $(\tau - 2t_n)$  соответствует времени прохождения импульса ультразвуковых колебаний непосредственно в образце, где  $\tau$  – измеренное дефектоскопом время прохождения волны от пьезопластины до отражателя и обратно, которое включает в себя акустическую задержку  $2t_n$ , на которую влияет материал призмы ПЭП. Дефектоскоп УД2-12 позволяет устранить её сдвинув нуль глубиномера относительно зондирующего

импульса с помощью регулятора «0» на блоке А6 верхней панели ПЭП. Для определения значения  $2t_n$  (рис. 1.5, б) необходимо выполнить последовательно следующие операции:

- проверить точку выхода луча ПЭП и одновременно настроить «нуль» глубиномера для этого необходимо:
- установить ПЭП на образец СО-3 и, перемещая ПЭП вдоль поверхности контакта и одновременно поворачивая его на угол  $2-3^\circ$  вокруг оси (*при этом уточняется направление луча ультразвуковых колебаний данного ПЭП*), получить максимальный эхо-сигнал от его боковой поверхности;
- проверить совпадение точки выхода луча на ПЭП с нулевой риской СО-3;
- застробировать максимальный эхо-сигнал от боковой поверхности СО-3 и выставить амплитуду импульса на стандартный уровень при помощи кнопок аттенюатора и регулятора «▷» на блоке А8;
- переключить блок цифрового отсчета на режим измерения  $\mu S$  с дискретностью отсчета 0,01 мкс;
- регулятором «0» (ушастый нуль) на блоке А6 выставить на БЦО значение  $\tau = 33,7$  мкс при радиусе образца СО-3  $R = 55$  мм (или  $\tau = 36,8$  мкс при  $R = 60$  мм) – тем самым вводится компенсация акустической задержки в призме выбранного ПЭП (для точного измерения координат отражателей). *При выполнении всех операций необходимо удерживать ПЭП на СО-3 в положении получения максимального эхо-сигнала;*
- установить ПЭП на поверхность полукруглого образца СО-3 таким образом, чтобы отражение ультразвуковых колебаний осуществлялось от вогнутой поверхности и первый отраженный сигнал достигал максимального значения;
- довести амплитуду сигнала до определенного уровня, например до середины экрана, но не менее двух больших клеток на экране ЭЛТ (выполняется с помощью кнопки «Ослабление dB» и (если требуется) регулятора «▷» на блоке А8);
- застробировать сигнал стробом АСД (регуляторы «↵» и «↶» – на блоке А10) или ручным стробированием (регулятор «↵» – на передней панели) (см. рис. 7.3);
- регулятором «0» на блоке А6 выставить на БЦО в режиме « $\mu S$ »

время распространения ультразвуковых колебаний:  $2t_{\text{п}} = 33,7$  мкс, если радиус вогнутой поверхности СО-3 составляет 55 мм, а если радиус равен 60 мм, то  $2t_{\text{п}} = 36,8$  мкс.

### Порядок и методика выполнения

При подготовке к контролю необходимо выполнить операции, представленные в табл. 1.1.

Таблица 1.1 – Способы косвенного измерения скоростей  $c_l$  и  $c_t$

Волна	Продольная		Поперечная
Метод отражения	Эхо-импульсный		
Принцип измерения	По двум донным сигналам в образце с плоскопараллельными поверхностями	По двум эхо-сигналам в полукруглом образце СО-3 радиусом $R$	По эхо-сигналу от углового отражателя на глубине $H$
Настройка нуля глубиномера	Не требуется, но важно, чтобы выполнялось условие $\tau_1 > 0$		По стандартному образцу СО-3 или СО-3Р
Порядок измерения скорости	Сенсорным переключателем установите на БЦО режим $\mu S$		
	Установите ПЭП на образец и получите последовательность донных импульсов	Установите ПЭП на горизонтальную поверхность и получите последовательность эхо-сигналов	Установите ПЭП на образец и получите максимум эхо-сигнала от углового отражателя
	Аттенюатором, а также регуляторами « $\Phi$ » (на блоке А8) и «АМПЛ» (на блоке А7) подведите к заранее выбранному уровню вершину сигнала:		
	– первого донного сигнала	– первого эхо-сигнала	– эхо-сигнала
	Застробируйте сигнал регуляторами « $\Phi$ » и «АМПЛ» (на блоке А10) или ручным стробированием « $\square$ » (на передней панели)		
	По БЦО определите значения:		
	$\tau_1$	$\tau_1$	$\tau$
	Подведите строб к выбранному уровню вершины второго донного сигнала		–
	Застробируйте сигнал		–
	По БЦО определите значение $\tau_2$		–
	С учетом полученных значений по расчетной формуле определите искомую скорость распространения ультразвуковых колебаний		

## Проведение контроля

Контроль проводится в следующей последовательности:

- 1) измерить скорость распространения продольных ультразвуковых волн  $c_l$  в лабораторных образцах из стали и оргстекла с плоскопараллельными поверхностями;
- 2) включить дефектоскоп и подключить к нему по совмещенной схеме прямой ПЭП (П111-2,5К12-002);
- 3) настроить УД2-12 по технологической карте (см. рис. 7.3);
- 4) в соответствии с указанной схемой прозвучивания троекратно выполнить процедуру измерения  $c_l$  любым способом (см. табл. 1.1) на образцах из стали и оргстекла. Результаты измерений и расчетов занести в табл. 1.2 и 1.3 соответственно;
- 5) измерить скорость распространения поперечных волн  $c_t$  в лабораторных образцах из стали с плоскопараллельными поверхностями и полукруглом;
- 6) включить дефектоскоп и подключить к нему по совмещенной схеме наклонный ПЭП с углом ввода  $\alpha = 50^\circ$  (П121-2,5-50°-002);
- 7) по указанным схемам прозвучивания троекратно выполнить процедуру измерения скорости  $c_t$  первым и вторым способами на образце с плоскопараллельными гранями и вторым способом на полукруглом образце СО-3. Результаты измерений и расчетов занести в табл. 1.4 и 1.5 соответственно.

Таблица 1.2 – Результаты измерений и расчетов скорости  $c_l$  (образец из стали)

Схема прозвучивания	Номер измерения	$H$ , мм	$\tau_1$ , мкс	$\tau_2$ , мкс	$c_l$ , мм/мкс	$c_l$ , м/с
	1					
	2					
	3					
	среднее значение					

Таблица 1.3 – Результаты измерений и расчетов скорости  $c_l$  (образец из оргстекла)

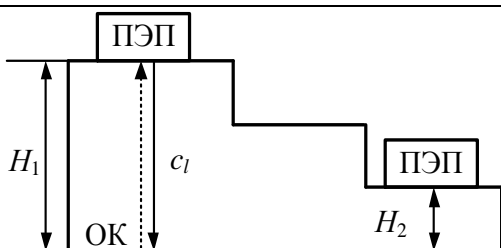
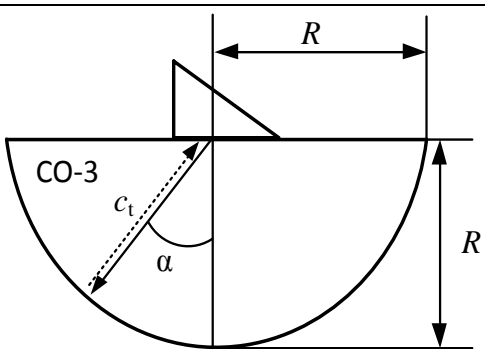
Схема прозвучивания	Номер измерения	$H_1$ , мм	$\tau_1$ , мкс	$\tau_2$ , мкс	$c_l$ , мм/мкс	$c_l$ , м/с
	1					
	2					
	3					
	среднее значение					

Таблица 1.4 – Результаты измерений и расчетов скорости  $c_t$  на образце с плоскопараллельными гранями

Схема прозвучивания	Номер измерения	$H$ , мм	$\tau_1$ , мкс	$\tau$ , мкс	$c_t$ , мм/мкс	$c_t$ , м/с
	1					
	2					
	3					
	среднее значение					

Таблица 1.5 – Результаты расчетов  $c_t$  на полукруглом образце

Схема прозвучивания	Номер измерения	$R$ , мм	$\tau_1$ , мкс	$\tau_2$ , мкс	$c_t$ , мм/мкс	$c_t$ , м/с
	1					
	2					
	3					
	среднее значение					

### Оценка результатов контроля

После проведения контроля необходимо сравнить полученные значения со стандартными: скорость продольной волны  $c_l$  для стали

5900 м/с, поперечной  $c_t$  – 3260 м/с; скорость продольной волны  $c_l$  для оргстекла – 2670 м/с, поперечной  $c_t$  – 1121 м/с. Сделать выводы.

Таблица 1.6 – Скорость звука в некоторых твёрдых телах

Материал	Продольные волны в протяженных твердых образцах, м/с	Волны сдвига и кручения, м/с
Алюминий	6420	3040
Латунь	4700	2110
Свинец	5950	3240
Железо	1960	690
Серебро	3650	1610
Нержавеющая сталь	5790	3100
Оргстекло	2680	1100
Полиэтилен	1950	540

*Отчет должен содержать:*

- 1) таблицы со схемами прозвучивания;
- 2) результаты измерений и расчетов;
- 3) формулы, по которым производились расчеты;
- 4) сопоставление положений теории УЗК и эмпирических данных;
- 5) выводы.

### Контрольные вопросы

1. Цель соблюдения техники безопасности при проведении контроля?
2. Что такое волновое движение? Виды и типы ультразвуковых волн.
3. В чем состоит различие между продольной и сдвиговой волнами?
4. Какие параметры ультразвуковых колебаний характерны для волн?
5. Что такое скорость волны? Чем она отличается от скорости колебательного движения частиц в волне?
6. Чем характеризуются давление и интенсивность акустической волны?
7. Для чего нужна шкала децибел?
8. Назовите способы косвенного измерения скоростей продольных и поперечных волн.
9. Что такое акустическая задержка  $2t_n$ ? Как она учитывается при измерении скоростей  $c_l$  и  $c_t$ ?

## **Лабораторная работа 2**

### **ОПРЕДЕЛЕНИЕ ЗАТУХАНИЯ УЛЬТРАЗВУКОВЫХ ВОЛН**

*Цель работы* – освоить измерение амплитуды эхо-сигналов и коэффициента затухания ультразвуковых волн.

*Аппаратура:* дефектоскоп ультразвуковой УД2-12; прямые пьезоэлектрические преобразователи на частоту 2,5 МГц (П111-2,5К12-002); наклонные ПЭП на частоту 2,5 МГц, с углом ввода луча  $\alpha = 50^\circ$  (П121-2,5-50°-002); кабели к ПЭП.

*Образцы:* стандартный образец типа СО-3; лабораторные образцы из малоуглеродистой стали и из оргстекла со ступенькой; минеральное масло или вода.

#### **Краткие теоретические сведения**

По мере удаления ультразвуковой волны от источника колебаний ее амплитуда, давление и интенсивность уменьшаются по закону экспоненты, что обусловлено затуханием. Оно предопределяется физико-механическими характеристиками среды и типом волны и учитывается коэффициентом затухания  $\delta$  [3, 4].

Коэффициент  $\delta$ , 1/м, складывается из коэффициентов поглощения  $\delta_n$  и рассеяния  $\delta_p$

$$\delta = \delta_n + \delta_p. \quad (2.1)$$

При поглощении ультразвуковой волны вследствие неидеальной упругости межмолекулярных сил часть потока звуковой энергии переходит в тепловой поток за счет внутреннего трения и теплопроводности среды. Коэффициент поглощения  $\delta_n$  в твердых средах (металлы, стекло) пропорционален частоте  $f$  колебаний волны и температуре среды. Чем больше частота ультразвука, тем больше циклов колебаний в единицу времени и тем больше потери при переходе энергии ультразвука в тепло. С увеличением температуры, как правило, все материалы увеличивают свою вязкость, при этом ослабевают их упругие свойства, что ведет к росту коэффициента  $\delta_n$ .

При рассеянии поток звуковой энергии остается звуковым, но уходит

из направленно распространяющегося пучка. Металлы, применяемые на практике, имеют зернистую структуру. Размеры зерен зависят от химического состава, вида механической и термической обработки деталей. Затухание волн в них предопределяется двумя факторами – рефракцией и рассеянием – вследствие анизотропии механических свойств. В результате рефракции фронт волны отклоняется от прямолинейного направления распространения и амплитуда принимаемых сигналов резко падает. Кроме того, волна, падающая на поверхность границы зерна, испытывает частичное отражение, преломление ультразвука и трансформацию, что и определяет механизм рассеяния. Рассеяние в отличие от рефракции приводит не только к ослаблению сигнала, но и к образованию шумов. Явление рассеяния тем сильнее, чем больше средний размер зерна по сравнению с длиной ультразвуковой волны.

Явления поглощения и рассеяния ослабляют ультразвуковую волну тем сильнее, чем больший путь в среде она проходит. При этом *амплитуда колебаний*  $\xi$  и *звуковое давление*  $P$  снижаются в  $e^\delta$  раз на каждую единицу длины пути  $r$ , проходимого волной, а *интенсивность*  $I$ , как энергетическая характеристика, – в  $e^{2\delta}$  раз, т. е.

$$\xi = \xi_0 \cdot e^{-\delta \cdot r}; \quad (2.2)$$

$$P = P_0 \cdot e^{-\delta \cdot r}; \quad (2.3)$$

$$I = I_0 \cdot e^{-2\delta \cdot r}. \quad (2.4)$$

Обычно работа с ПЭП при дефектоскопии осуществляется в дальней зоне его акустического поля, основной характеристикой которой является равномерное убывание давления при удалении от излучателя, поэтому к уменьшенным величинам  $\xi$ ,  $P$ ,  $I$  должны добавляться уменьшенные величины от раскрытия ультразвукового луча в дальней зоне. Это уменьшение, вызываемое так называемым дифракционным расхождением ультразвукового луча, обратно пропорционально расстоянию  $r$  от ПЭП до отражателя:

$$\pi \frac{L_6}{r} = \pi \frac{a^2}{r\lambda} \text{ (так как } L_6 = \frac{a^2}{\lambda} \text{)}, \quad (2.5)$$



где  $L_\delta$  – длина ближней зоны ПЭП;  $a^2$  – диаметр его пьезопластины.

Например, звуковое давление  $P$  на расстоянии  $r$  от ПЭП рассчитывается по формуле

$$P \approx \frac{\pi a^2}{r\lambda} P_0 e^{-\delta \cdot r}. \quad (2.6)$$

Так как давление  $P$  в акустическом законе Ома эквивалентно электрическому напряжению  $U$  на пьезопластине ПЭП, то амплитуду зондирующих и отраженных сигналов, с которыми оперируют при работе с дефектоскопом, обозначают через  $U$  с соответствующими индексами.

Тогда амплитуду сигнала ультразвуковой волны в среде на расстоянии  $r$  от ПЭП, с учетом уравнения (2.4), можно рассчитать по уравнению:

$$U \approx \frac{\pi a^2}{x\lambda} U_0 e^{-\delta \cdot x}. \quad (2.7)$$

#### *Измерение коэффициента затухания поперечной волны $\delta_t$*

Так как коэффициент затухания поперечной волны  $\delta_t$  характеризует ослабление амплитуды волны в зависимости от расстояния  $r$ , пройденного волной (см. формулу (2.7)), то достаточно сравнить две амплитуды на двух фиксированных отрезках пути, пройденных волной. Для этого выберем способ прозвучивания образца высотой  $H$  (рис. 2.1) с угловыми отражателями поперечной волной от наклонного ПЭП с углом ввода  $\alpha$  [4].

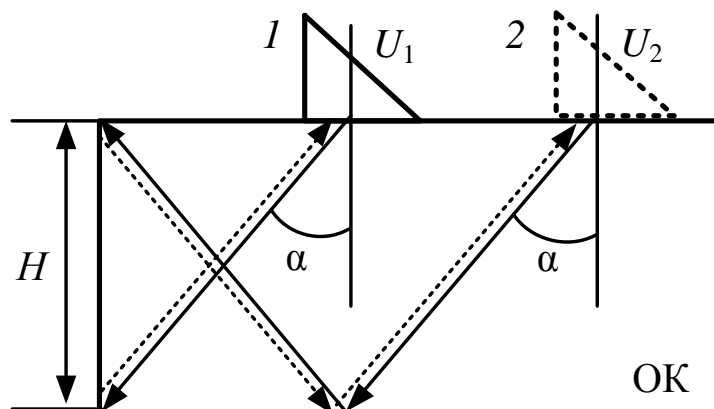


Рисунок 2.1 – Схема прозвучивания образца высотой  $H$  поперечной волной от наклонного ПЭП

При установке ПЭП в положение 1 путь, пройденный волной (однократное отражение):  $r_1 = \frac{2H}{\cos \alpha}$ , в положение 2 (двукратное отражение):

$$r_2 = \frac{4H}{\cos \alpha}.$$

Соответственно амплитуды волн с учетом уравнения (2.7) определяются по формулам:

$$\left. \begin{aligned} U_1 &= \frac{\pi a^2}{\lambda r_1} U_0 e^{-\delta_t r_1} = \frac{\pi a^2}{2H\lambda} U_0 e^{-\delta_t \frac{2H}{\cos \alpha}} \cos \alpha \\ U_2 &= \frac{\pi a^2}{\lambda r_2} U_0 e^{-\delta_t r_2} = \frac{\pi a^2}{2H\lambda} U_0 e^{-\delta_t \frac{4H}{\cos \alpha}} \cos \alpha \end{aligned} \right\}. \quad (2.8)$$

Ослабление волны оценивается отношением значений амплитуд волн:

$$\frac{U_2 / U_0}{U_1 / U_0} = \frac{\frac{\pi a^2}{4H\lambda} \cos \alpha e^{-\delta_t \frac{4H}{\cos \alpha}}}{\frac{\pi a^2}{2H\lambda} \cos \alpha e^{-\delta_t \frac{2H}{\cos \alpha}}} = \frac{1}{2} e^{-\delta_t \frac{2H}{\cos \alpha}} \quad (2.9)$$

Отношение (2.7), но уже в децибелах примет вид:

$$20 \cdot \lg \frac{U_2}{U_0} - 20 \cdot \lg \frac{U_1}{U_0} = 20 \cdot \lg \frac{1}{2} \delta_t \frac{2H}{\cos \alpha} 20 \cdot \lg e, \quad (2.10)$$

отсюда

$$\delta_t = \frac{20 \cdot \lg \frac{1}{2} - 20 \cdot \lg \frac{U_2}{U_0} + 20 \cdot \lg \frac{U_1}{U_0}}{2H \cdot 20 \lg e} \cos \alpha, \quad (2.11)$$

здесь  $20 \lg e = 8,685$ ;  $20 \lg(1/2) = -6$  дБ, тогда

$$20 \cdot \lg \frac{U_2}{U_0} = U_{II}; \quad 20 \cdot \lg \frac{U_1}{U_0} = U_I. \quad (2.12)$$

Принимая во внимание, что значения  $U_I$  и  $U_{II}$  при работе с дефектоскопом УД2-12 снимаются с кнопочного аттенюатора в

отрицательных децибелах, тогда окончательно формула для определения коэффициента затухания поперечной волны примет вид:

$$\delta_t = \frac{U_I - U_{II} - 6}{17,37H} \cos \alpha. \quad (2.13)$$

Таким образом, для косвенного измерения коэффициента затухания  $\delta_t$  поперечной волны при данной схеме прозвучивания в образце – параллелепипеде высотой  $H$  – необходимо измерить амплитуду эхо-сигналов  $U_I$  и  $U_{II}$  в отрицательных децибелах на пути одно- и двукратного отражения от двугранных углов.

*Измерение коэффициента затухания продольной волны  $\delta_l$*

Наиболее доступным способом измерения коэффициента затухания продольной волны является способ, при котором измеряются и сравниваются амплитуды донных эхо-сигналов в образце со ступеньками (рис. 2.2) при прозвучивании его прямым ПЭП на участках различной высоты, например  $H_1$  и  $H_2$ .

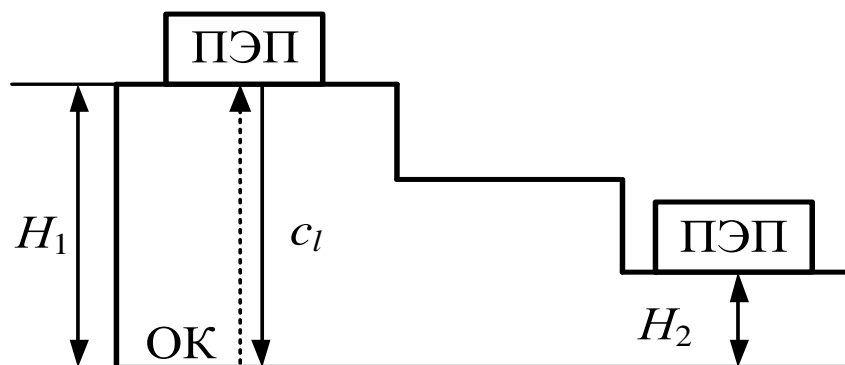


Рисунок 2.2 – Схема прозвучивания образца со ступеньками

Отношение амплитуд волн:

$$\left. \begin{aligned} \frac{U_1}{U_0} &= \frac{\pi a^2}{\lambda 2 H_1} e^{-\delta_l 2 H_1} \\ \frac{U_2}{U_0} &= \frac{\pi a^2}{\lambda 2 H_2} e^{-\delta_l 2 H_2} \end{aligned} \right\}. \quad (2.14)$$

Сравнение амплитуд в децибелах даст следующую формулу для косвенного измерения:

$$\delta_l = \frac{U_I - U_{II} + 21 \lg \frac{H_2}{H_1}}{17,37(H_2 - H_1)}. \quad (2.15)$$

Можно произвести измерения и на одной ступеньке, но использовать не только первый донный эхо-сигнал, но и второй или третий эхо-сигналы и т. д. При использовании, например, первого и второго донных эхо-сигналов соответствующие отрезки пути, пройденные ими, будут отличаться друг от друга в два раза. Тогда формула (2.15) для данного случая примет вид

$$\delta_l = \frac{U^{(I)} - U^{(II)} - 6}{17,37H}, \quad (2.16)$$

где  $U^{(I)}$ ,  $U^{(II)}$  – амплитуда первого и второго донного эхо-сигнала в отрицательных децибелах соответственно;  $H$  – высота ступеньки.

Как и в случае косвенного измерения  $\delta_b$ , для измерения  $\delta_l$  необходимо измерить: амплитуду эхо-сигналов  $U_I$  и  $U_{II}$  или  $U^{(I)}$  и  $U^{(II)}$  в отрицательных децибелах и расстояние от ПЭП до отражателя.

### **Порядок и методика выполнения**

*Подготовка к контролю:* ознакомиться с техническим описанием дефектоскопа УД2-12 (разд. 7).

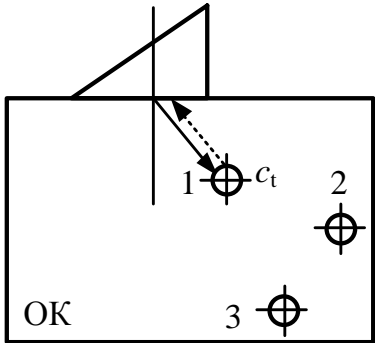
*Проведение контроля:*

1) измерить амплитуду эхо-сигналов от различных отражателей;  
2) включить дефектоскоп УД2-12 и подключить к нему по совмещенной схеме наклонный ПЭП с углом ввода луча  $\alpha = 50^\circ$  и частотой  $f = 50$  МГц (П121-22,5-50°-002);

3) не менее трех раз в соответствии со схемой прозвучивания образца, указанной в табл. 2.1, измерить максимальную амплитуду эхо-сигналов от отражателей, расположенных на различной глубине  $H$ . При этом амплитуда эхо-сигналов на экране дефектоскопа должна

устанавливаться с помощью аттенюатора до шести больших клеток (БК) табло на экране ЭЛТ. Значения амплитуды, соответствующие показаниям аттенюатора, занести в табл. 2.1.

Таблица 2.1 – Результаты измерений амплитуды эхо-сигналов

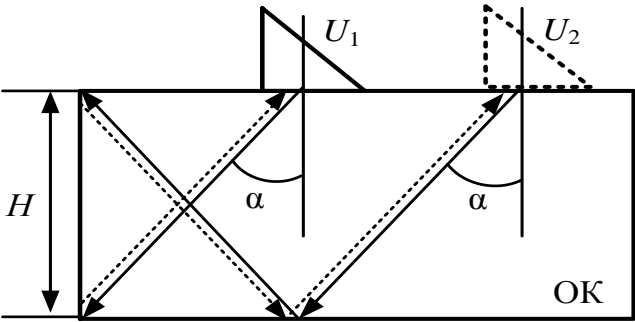
Схема прозвучивания образца	$H$ , мм	$U$ , дБ			Среднее значение $U$ , дБ
		1	2	3	
					

*Измерить коэффициент затухания поперечных волн  $\delta_t$ :*

1) включить дефектоскоп УД2-12 и подключить к нему по совмещенной схеме наклонный ПЭП с углом ввода луча  $\alpha = 50^\circ$  и частотой  $f=2,5$  МГц (П121-2,5-50°-002);

2) не менее трех раз в соответствии со схемой прозвучивания образца, указанной в табл. 2.2, измерить максимальную амплитуду эхо-сигналов  $U_I$  и  $U_{II}$  от двугранных углов в образце из стали. Расчет произвести по формуле (2.11). Результаты измерений и расчетов занести в табл. 2.2.

Таблица 2.2 – Результаты измерений и расчетов

Схема прозвучивания	Номер измерения	$H$ , мм	$U_I$ , дБ	$U_{II}$ , дБ	$\delta_t$ , 1/мм
	1				
	2				
	3				
	среднее значение				

4) измерить коэффициент затухания продольных волн  $\delta_l$  (схема прозвучивания образца из стали приведена в табл. 2.3):

– включить дефектоскоп и подключить к нему по совмещенной схеме прямой ПЭП на частоту 2,5 МГц (П111-2,5К12-002);

– не менее трех раз измерить максимальную амплитуду первого  $U_I$  и второго  $U_{II}$  донных эхо-сигналов. Коэффициент  $\delta_l$  рассчитать по формуле (2.14).

Результаты измерений и расчетов занести в табл. 2.3.

Таблица 2.3 – Результаты измерений и расчетов

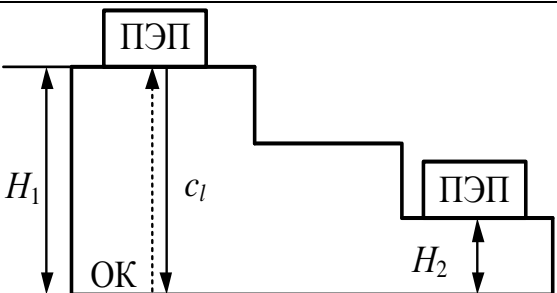
Схема прозвучивания	Номер измерения	$H$ , мм	$U_I$ , дБ	$U_{II}$ , дБ	$\delta_l$ , 1/мм
	1				
	2				
	3				
	среднее значение				

Схема прозвучивания образца из оргстекла (со ступеньками) представлена в табл. 2.4:

– включить дефектоскоп и подключить к нему по совмещенной схеме прямой ПЭП на частоту 2,5 МГц (П111-2,5К12-002);

– не менее трех раз измерить максимальную амплитуду эхо-сигналов на первой  $U_I$  и третьей  $U_{III}$  ступеньках. Коэффициент  $\delta_l$  рассчитать по формуле (2.14). Результаты измерений и расчетов занести в табл. 2.4.

Таблица 2.4 – Результаты измерений и расчетов

Схема прозвучивания	Номер измерения	$H_1$ , мм	$H_2$ , мм	$U_I$ , дБ	$U_{II}$ , дБ	$\delta_l$ , 1/мм
	1					
	2					
	3					
	среднее значение					

*Оценка результатов контроля:* провести сравнительную оценку коэффициента затухания продольной и поперечной волны в образцах, изготовленных из разных материалов.

*Отчет должен содержать:*

- 1) таблицы со схемами прозвучивания;
- 2) результаты измерений и расчетов;
- 3) формулы, по которым производились расчеты;
- 4) сопоставление положений теории УЗК и эмпирических данных;
- 5) выводы.

### Контрольные вопросы

1. Почему необходимо соблюдать технику безопасности при проведении контроля?
2. От чего зависит затухание ультразвука в твердых средах?
3. Что такое рассеяние ультразвука, чем оно характеризуется?
4. Что такое поглощение ультразвука, чем оно характеризуется?
5. Как нужно учитывать затухание при использовании ультразвуковых колебаний?

### Лабораторная работа 3

## ПОСТРОЕНИЕ ДИАГРАММЫ НАПРАВЛЕННОСТИ ПЬЕЗОЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ

*Цель работы* – освоить метод экспериментального определения диаграммы направленности (ДН) наклонных ПЭП.

*Аппаратура:* дефектоскоп УД2-12; наклонные преобразователи на частоту 2,5 МГц с углами ввода 50° или 65°; кабель к ПЭП.

*Образцы:* стандартные образцы СО-2 и СО-3; линейка с миллиметровыми делениями; минеральное масло или вода.

### Краткие теоретические сведения

Объектом исследования является ПЭП типа П121-2,5-50°-002 с углом ввода  $\alpha = 50^\circ$ , работающий на частоте  $f = 2,5$  МГц, объектом контроля – стандартный образец СО-2 по ГОСТ 14782-76, на который нанесены шкалы, проградуированные в значениях угла  $\alpha$  преломления луча (рис. 3.1, б).

Диаграмма направленности в виде функции  $\Phi(\alpha)$  в полярной системе координат может быть определена по огибающей амплитуд эхо-сигналов от ненаправленного отражателя в образце из контролируемого металла, измеренной с помощью типовой аппаратуры (рис. 3.1, а). В общем случае ДН  $\Phi(\alpha)$  ПЭП связана с огибающей амплитуд эхо-сигналов  $v(x)$  от ненаправленного отражателя (цилиндрическое поперечное отверстие) на глубине  $H_0$  в образце контролируемого металла функцией по соотношению

$$\Phi_3(\alpha) = \Phi_3\left(\arctg \frac{x}{H_0}\right) = \sqrt{v(x)} \left[ H_0^2 \left( \frac{x^2}{H_0^2} + 1 \right) \right]^{\frac{n}{2}} \exp \left[ 2\delta_{t2} H_0 \left( \frac{x^2}{H_0^2} + 1 \right)^{\frac{1}{2}} \right], \quad (3.1)$$

где  $n$  – показатель, определяемый типом ненаправленного отражателя (для сферы  $n = 2$ , для цилиндра – 1,5).



Огибающую амплитуд эхо-сигналов  $v(x)$  при перемещении ПЭП с шагом 1–2 мм измеряют с помощью дефектоскопа, имеющего аттенуатор. Для перехода от полученной нормированной огибающей  $v(x)$  к ДН необходимо выполнить следующие действия:

1) каждое значение  $v(x)$  умножить на соответствующее значение заранее рассчитанной функции:

$$F_1\left(\frac{x}{H_0}\right) = \left[ H_0^2 \left( \frac{x^2}{H_0^2} + 1 \right) \right]^{\frac{n}{2}} \exp \left[ 2\delta_{t2} H_0 \left( \frac{x^2}{H_0^2} + 1 \right)^{\frac{1}{2}} \right], \quad (3.2)$$

т.е.

$$\sqrt{v(x)} F_1\left(\frac{x}{H_0}\right) = \Phi_1^2\left(\frac{x}{H_0}\right); \quad (3.3)$$

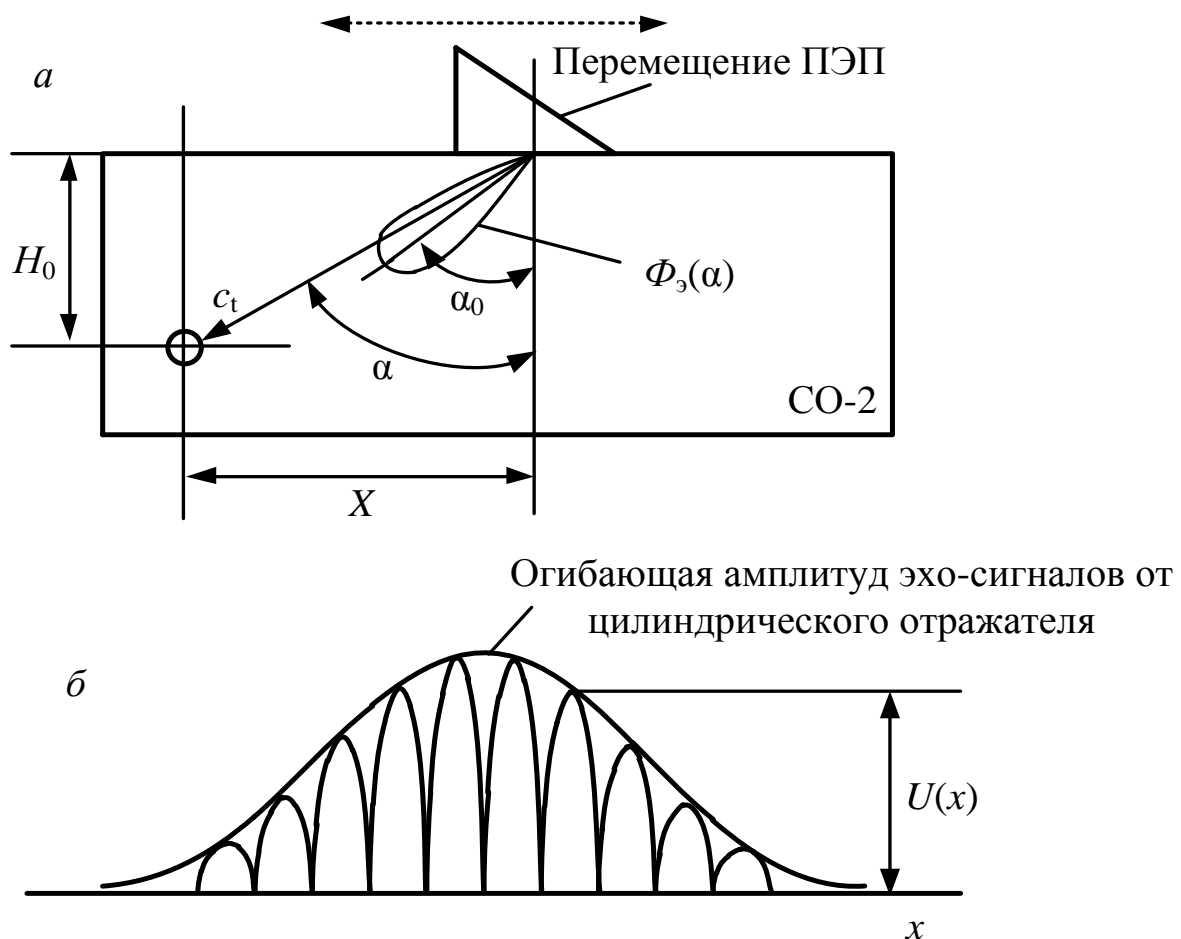


Рисунок 3.1 – Огибающая амплитуд эхо-сигналов

2) извлечь квадратный корень из функции  $\Phi_1^2\left(\frac{x}{H_0}\right)$ ;

3) перевести функцию  $\Phi_1\left(\frac{x}{H_0}\right)$  в функцию  $\Phi_1(\alpha)$ , заменив параметр

$\left(\frac{x}{H_0}\right)$  на  $\alpha = \operatorname{arctg} \frac{x}{H}$ ;

4) вычислить искомую функцию ДН  $\Phi_3(\alpha) = \Phi_1(\alpha) \cdot \Phi_{1\max}(\alpha)$ .

При использовании стандартного образца СО-2 измеряют непосредственно  $\nu(\alpha)$  как функцию угла преломления  $\alpha$ , а при пересчете ее в диаграмму направленности  $\Phi_3(\alpha)$  пренебрегают затуханием ультразвука на пути до отражателя.

### **Порядок и методика выполнения лабораторной работы**

*Подготовка к контролю:* ознакомиться с техническим описанием дефектоскопа УД2-12 (п. 7.1) и инструкцией по соблюдению техники безопасности при проведении контроля (п. 7.2).

*Проведение контроля:*

1) включить дефектоскоп с преобразователем  $\alpha = 50^\circ$ ;

2) определить по стандартному образцу СО-3 точку выхода луча ПЭП. Для этого установить ПЭП над центральной риской СО-3 и небольшими перемещениями его найти положение, соответствующее максимальному эхо-сигналу от фокусирующей поверхности образца. Точка выхода при этом расположена точно над центральной риской СО-3;

3) установить ПЭП на стандартный образец СО-2 в положение, при котором амплитуда эхо-сигнала от цилиндрического отражателя ( $\varnothing = 6$  мм) максимальна, и против метки на шкале отсчитать угол ввода луча  $\alpha_0$ , смещая ПЭП влево и вправо, определить значения углов  $\alpha_{\min}$  и  $\alpha_{\max}$ , при которых еще можно измерить амплитуду эхо-сигналов от отверстия; значения  $\alpha_{\min}$ ,  $\alpha_0$ ,  $\alpha_{\max}$  записать в табл. 3.1;

4) перемещая ПЭП по образцу в пределах значений от  $\alpha_{\min}$  до  $\alpha_{\max}$

по шкале, определить в децибелах значения амплитуды  $v(\alpha)$  эхо-сигналов от цилиндрического отражателя диаметром  $\varnothing = 6$  мм при совмещении точки выхода луча с каждым делением на шкале СО-2; измерения выполнить три раза (в процессе каждого измерения обеспечивать надежный акустический контакт и повторяемость результатов), результаты измерений записать в табл. 3.1;

Таблица 3.1 – Результаты измерений для расчета ДН

ПЭП				Контролируемый металл		
$\beta$ , град	$\alpha$ , град	$a$ , мм	$F$ , МГц	$\alpha_0$ , град	$\alpha_{\min}$ , град	$\alpha_{\max}$ , град

5) вписать в табл. 3.2 соответствующие значения функции  $F_1(\alpha)$ , которые определяются по диаграмме (рис. 3.2) и учитывают влияние расстояния от точки ввода луча до цилиндрического отражателя на амплитуду  $v(\alpha)$  эхо-сигнала;

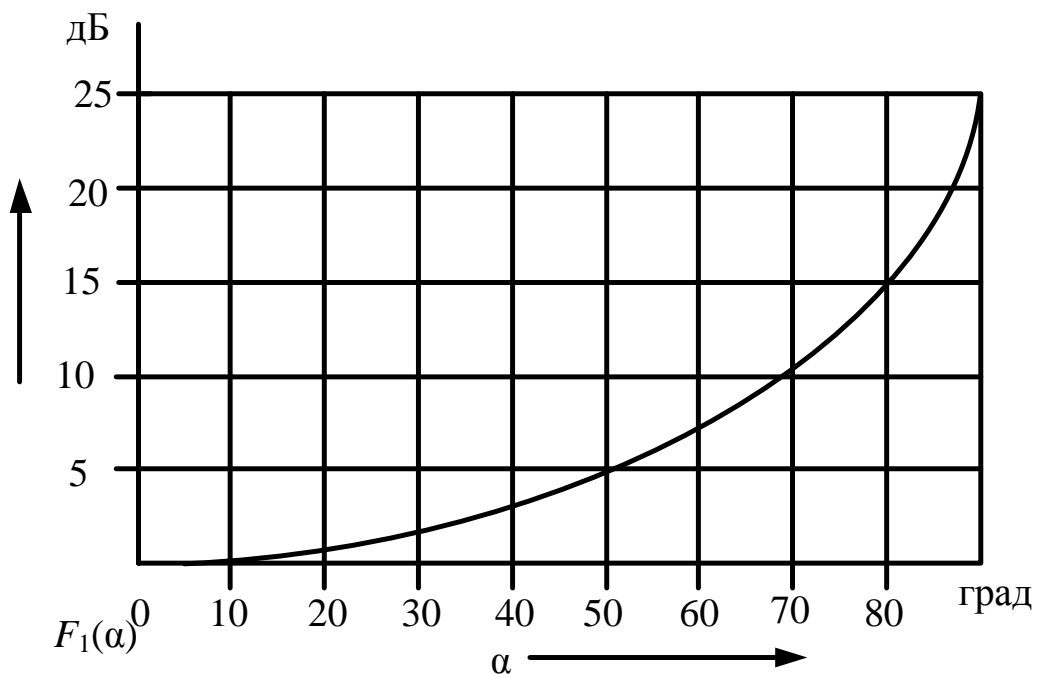


Рисунок 3.2 – Диаграмма влияния расстояния от точки ввода луча на амплитуду эхо-сигнала

Таблица 3.2 – Результаты расчета функции ДН

$\alpha$ , град	$\nu(\alpha)$ , дБ				$F_1(\alpha)$ , дБ	$F_2(\alpha)$ , дБ	$\Phi_3^2(\alpha)$	$0,5 F_2(\alpha)$ , дБ	$\Phi_3(\alpha)$
	1	2	3	среднее значение					

б) к каждому значению  $\nu(\alpha)$  прибавить соответствующее значение функции  $F_1(\alpha)$  (в децибелах);

7) нормировать функцию  $[\nu(\alpha) + F_1(\alpha)]$ , отняв от всех ее значений максимальное значение этой функции, соответствующее углу  $\alpha$  наклона оси ДН:  $F_2(\alpha) = [\nu(\alpha) + F_1(\alpha)] - [\nu(\alpha_0) + F_1(\alpha_0)]$ , затем, пользуясь номограммой или таблицей, перевести значения  $F_2(\alpha)$  из децибел в относительные единицы функции  $\Phi_3^2(\alpha)$ ;

8) разделить значения функции  $F_2(\alpha)$  пополам и, пользуясь номограммой, перевести полученные значения в децибелах в относительные значения искомой функции  $\Phi_3^2(\alpha)$ , результаты записать в табл. 3.2;

9) по результатам расчета на миллиметровой бумаге построить ДН в режиме  $\Phi_3(\alpha)$  излучения и в режиме излучения-приема  $\Phi_3^2(\alpha)$ .

Результаты измерений и расчета записать в табл. 3.2.

*Оценка результатов контроля:* провести сравнение диаграмм направленности, построенных при различных углах ввода ультразвукового луча.

*Отчет должен содержать:*

- 1) таблицы с экспериментальными и расчетными данными;
- 2) диаграммы направленности поля ПЭП, построенные по данным

расчета и измерений;

3) формулы, по которым проводятся расчеты;

4) сопоставление положения теории УЗК и экспериментальных данных;

5) выводы.

### **Контрольные вопросы**

1. Цель техники безопасности при проведении контроля?

2. Раскройте понятие «диаграмма направленности» в ультразвуковом контроле.

3. Какие параметры прямого ПЭП «формируют» ДН его поля?

4. Какие параметры наклонного ПЭП определяют направленность поля поперечной волны, возбуждаемой им?

5. Как изменяется ширина лепестка ДН по мере уменьшения скорости продольной волны в призме преобразователя?

6. Как влияет материал ОК на формирование ДН поля ПЭП? 7. Какова методика определения ДН наклонного ПЭП по огибающей амплитуд эхосигналов от ненаправленного отражателя?

## Лабораторная работа 4

### ПРОВЕДЕНИЕ НАСТРОЙКИ ГЛУБИНОМЕРА УЛЬТРАЗВУКОВОГО ДЕФЕКТОСКОПА ТИПА УД2-12

*Цель работы* – приобрести навыки настройки глубиномера дефектоскопа УД2-12 и определения координат отражателей и толщины образцов.

*Аппаратура:* ультразвуковой дефектоскоп УД2-12; прямые пьезоэлектрические преобразователи на частоту 2,5 МГц (П111-2,5К12-002); наклонные ПЭП на частоту 2,5 МГц с углом ввода луча  $\alpha = 50^\circ$  (П121-2,5-50°-002).

*Образцы:* стандартные образцы СО-1, СО-2 и СО-3; линейка с миллиметровыми делениями, штангенциркуль, минеральное масло или вода.

#### Краткие теоретические сведения

С помощью глубиномера измеряют координаты отражателей (дефектов) (рис. 4.1, а) и толщину контролируемого слоя, а также определяют контролируемый слой на заданной глубине объекта контроля [5, 6].

Работа глубиномера основана на измерении времени распространения ультразвуковых колебаний от момента излучения зондирующего импульса до момента приема эхо-сигнала с пересчетом в требуемую координату. Для прямых ПЭП формула пересчета в глубину залегания отражателя имеет вид

$$H = c_l \frac{T}{2}, \quad (4.1)$$

где  $H$  – глубина дефекта, мм;  $c_l$  – скорость  $l$ -волны, мм/мкс;  $T$  – время между ЗИ и эхо-импульсом, мкс (рис. 4.1, б).

Для наклонных ПЭП (рис. 4.2 и 4.3) формулы пересчета в координаты залегания отражателя имеют вид

$$L = \left[ \frac{c_t (T - 2t_n)}{2} \right] \sin \alpha; \quad (4.2)$$

$$H = \left[ \frac{c_t (T - 2t_n)}{2} \right] \cos \alpha, \quad (4.3)$$

где  $c_t$  – скорость поперечной волны, мм/с;  $t_n$  – время распространения ультразвуковой волны в призме ПЭП или акустическая задержка, мкс.

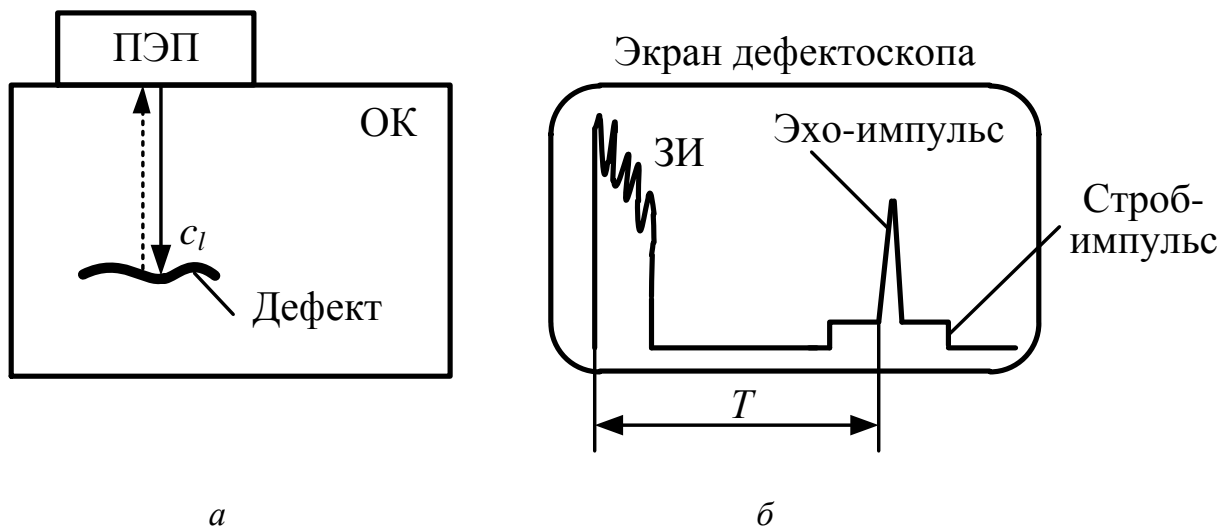


Рисунок 4.1 – Схема приема отраженного сигнала для прямого ПЭП

Из рис. 4.2 видно, что  $L = X$  – смещение дефекта относительно ПЭП,  $H = Y$  – глубина залегания отражателя. В УД2-12 все координаты определяются в декартовой системе координат.

В современных дефектоскопах, например в УД2-12, измерение времени  $T$  между ЗИ и первым застробированным и превышающим определенный уровень эхо-сигналом происходит автоматически (в УД2-12 определенный уровень равен двум большим клеткам табло на экране электронно-лучевой трубки (ЭЛТ)).

При любых способах настройки глубиномера в ультразвуковых дефектоскопах тактика одна и та же: вначале настраивают «нуль глубиномера», а затем выставляют значения координат отражателя относительно этого «нуля» по известным значениям либо расстояния, мм, либо времени, мкс.

Органы управления дефектоскопа УД2-12 (рис. 4.3) для настройки глубиномера расположены на его верхней панели (ВП). Регулятор «Ю» («ушастый» нуль) на блоке А6 предназначен для установки нуля глубиномера

(значения компенсации времени распространения ультразвуковых колебаний); в крайнем правом положении регулятора компенсация равна нулю.

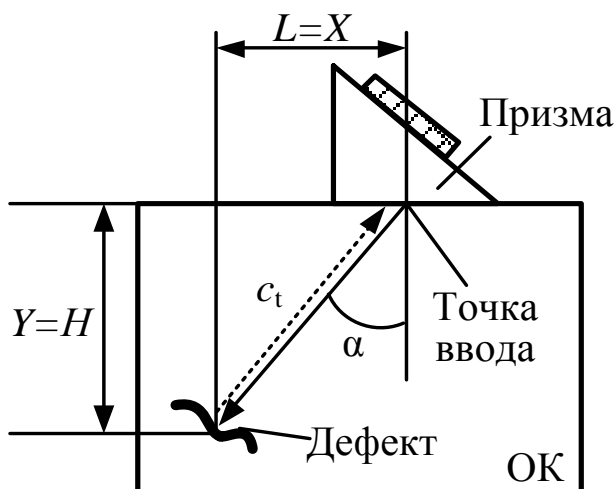


Рисунок 4.2 – Схема приема отраженного сигнала для наклонного ПЭП

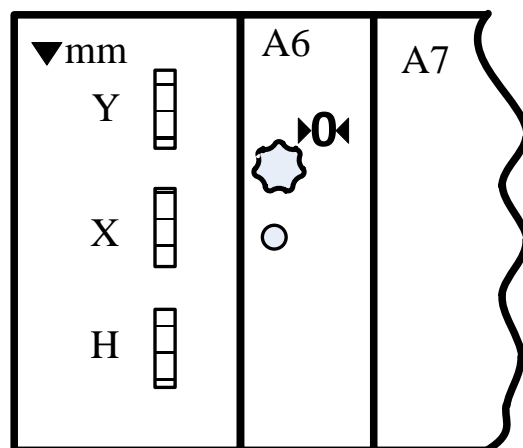


Рисунок 4.3 – Расположение регуляторов настройки глубиномера

Гнездо «3» на блоке A6 предназначено для контроля (измерения) длительности компенсации  $2t_n$ . Регуляторы «V mmH», «V mmX» и «V mmY» на блоке A5 предназначены для калибровки глубиномера при измерении соответственно координат H, X и Y. Необходимость сдвига нуля глубиномера (рис. 4.5) относительно зондирующего импульса с помощью регулятора «0» обусловлена наличием акустической задержки  $2t_n$  – времени распространения ультразвуковых колебаний в ПЭП. Установка нуля глубиномера необходима всегда для компенсации  $2t_n$  в данном ПЭП.

Регуляторами «V mmH», «V mmX» и «V mmY» устанавливают, по существу, коэффициенты  $K_1$ – $K_3$  пересчета временного интервала (между нулем глубиномера и требуемым отраженным сигналом) в соответствующую координату H, X или Y, поэтому выражения (4.1) – (4.3) можно переписать так:

$$H = c_t \frac{T}{2} = K_1 T; \quad (4.4)$$

$$X = \left[ c_t \left( \frac{T - 2t_n}{2} \right) \right] \sin \alpha = K_2 T_n; \quad (4.5)$$



$$Y = \left[ c_t \left( \frac{T - t_{\text{п}}}{2} \right) \right] \cos \alpha = K_3 T_{\text{и}}. \quad (4.6)$$

В формулах (4.4)–(4.6) коэффициенты пересчета  $K_1 - K_3$  определяются скоростью распространения и углом ввода ультразвуковых колебаний в ОК.

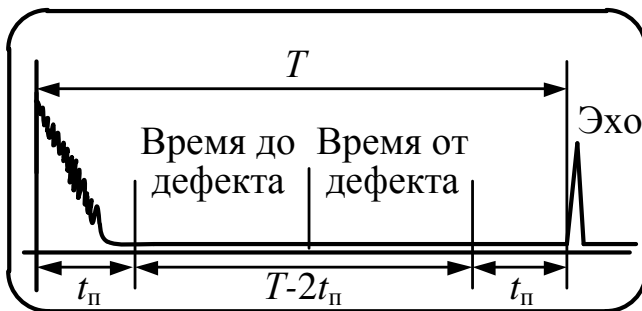


Рисунок 4.4 – Схема распределения импульсов на экране дефектоскопа для наклонного ПЭП:

$t_{\text{п}}$ ,  $T - t_{\text{п}}$  – время распространения продольной волны в призме и ОК соответственно

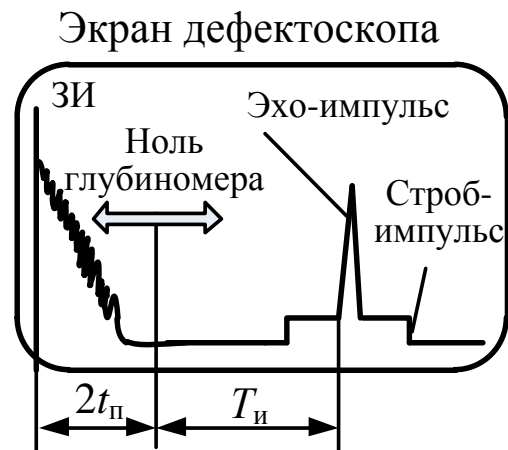






Рисунок 4.5 – Схема экрана дефектоскопа при настройке глубиномера

### Порядок и методика выполнения

#### *Настройка глубиномера для наклонного ПЭП:*

- 1) подключить к дефектоскопу наклонный ПЭП (П121-2,5-50°-002);
- 2) установить ПЭП на поверхность стандартного образца СО-3 таким образом, чтобы получить на экране ЭЛТ максимальный эхо-сигнал от вогнутой поверхности. Определить (уточнить) точку ввода луча. Застробировать полученный эхо-сигнал (т. е. установить регуляторами «» и «» на блоке А10 (ВП) строб АСД таким образом, чтобы эхо-импульс был расположен посередине строба). В режиме БЦО «μS» при отжатой кнопке «» на блоке А6 (ВП) регулятором «» выставить значение 33,7, если радиус  $R_{\text{СО-3}} = 55$  мм, или 36,8, если  $R_{\text{СО-3}} = 60$  мм, при этом эхо-сигнал должен быть в стробе и иметь амплитуду не менее двух

больших клеток табло на экране ЭЛТ;

3) установить ПЭП на поверхность образца СО-2 в положение максимума эхо-сигнала от отверстия  $\varnothing$  6 мм на глубине 44 мм. Застробировать эхо-сигнал. Уточнить (определить) угол ввода луча по шкале  $\alpha$ ;

4) настроить глубиномер поочередно двумя способами:

*первый способ* – не сдвигая ПЭП на образце СО-2:

а) измерить линейкой расстояние от нуля шкалы  $\alpha$  до точки выхода луча ПЭП, и это расстояние, уменьшенное на 2 мм, выставить в режиме БЦО «mm X» регулятором « $\nabla$  mmX» на блоке А5 (ВП);

б) в режиме БЦО «mm Y» регулятором « $\nabla$  mmY» на блоке А5 (ВП) выставить значение 42;

*второй способ* – для любого положения ПЭП (он может быть вне СО-2):

а) соединить перемычкой (из комплекта УД2-12) гнезда «4» и «2» на блоке А6 (ВП) и нажать кнопку « $\nabla$ » (на этом же блоке) для включения режима внутреннего измерения;

б) регулятором « $\mu$ » на блоке А6 (ВП) в режиме БЦО « $\mu$ S» (при нажатой кнопке « $\nabla$ ») выставить значение 200  $\mu$ s;

в) в режиме БЦО «mmX» выставить регулятором « $\nabla$  mmX» значение  $X^*$  из табл. 4.1 для угла ввода  $\alpha$ , измеренного в п. 2;

Таблица 4.1 – Определение угла ввода луча

$\alpha_0$	$X^*$	$Y^*$	$\alpha_0$	$X^*$	$Y^*$	$\alpha_0$	$X^*$	$Y^*$	$\alpha_0$	$X^*$	$Y^*$
31	167,9	279,2	41	213,9	246,0	51	253,3	205,1	61	285,1	158,0
32	172,7	276,5	42	218,1	242,3	52	256,9	200,7	62	287,8	153,0
33	177,6	273,4	43	222,4	238,4	53	260,3	196,2	63	290,5	148,0
34	182,3	270,3	44	226,4	234,5	54	263,7	191,7	64	293,0	142,9
35	187,0	267,0	45	230,5	230,5	55	267,0	187,0	65	295,5	137,8
36	191,6	263,7	46	234,5	226,4	56	270,3	182,3	66	297,8	132,6
37	196,2	260,3	47	238,4	222,3	57	273,4	177,5	67	300,1	127,4
38	200,7	256,9	48	242,3	218,1	58	276,5	172,7	68	302,3	122,1
39	205,2	253,3	49	246,0	213,9	59	279,4	167,9	69	304,3	116,8
40	209,5	249,7	50	249,7	209,5	60	282,3	163,0	70	306,3	11,5

г) в режиме БЦО «mmY» выставить регулятором « $\nabla$  mmY» значение  $Y^*$  из табл. 4.1 для угла ввода  $\alpha$ , измеренного в п. 2;

д) на блоке А6 отжать кнопку « $\nabla$ » и установить в исходное крайнее положение (по часовой стрелке) регулятор «4».

5) оценить точность настройки глубиномера по каждому способу. Для этого измерить координаты  $X$  и  $Y$  нижнего углового отражателя СО-2, поместив ПЭП на его боковую поверхность. Плавно переместив ПЭП, получить максимальный эхо-сигнал от нижнего угла. Застробировать эхо-сигнал, поочередно включая режимы БЦО «mmY» и «mmX». Записать показания, определить погрешность измерения для обоих способов настройки глубиномера.

*Настройка глубиномера для прямого ПЭП с использованием СО-2:*

1) подключить к дефектоскопу прямой ПЭП (П111-2,5-К12-002);

2) установить регулятор «4» на блоке А6 (ВП) в среднее положение;

3) установить ПЭП на поверхность СО-2 вне отверстий. Получить на экране изображение первого донного импульса с амплитудой около 2/3 вертикальной шкалы (ВШ) табло экрана ЭЛТ;

4) застробировать первый донный импульс;

5) в режиме БЦО « $\mu S$ » при отжатой кнопке « $\nabla$ » на блоке А6 регулятором «Ю» выставить значение 20  $\mu S$  (для стандартного образца СО-2 с высотой  $H = 59$  мм) или 22  $\mu S$  (для образца СО-2  $H = 65$  мм);

6) настроить глубиномер поочередно двумя способами:

*первый способ* – не сдвигая ПЭП:

а) в режиме БЦО «mmH» регулятором « $\nabla$  mmH» (А5) выставить значение 59 (или 65 для СО-2 с высотой  $H = 65$  мм);

*второй способ* – для любого положения ПЭП:

а) соединить перемычкой гнезда «4» и «2» на блоке А6;

б) в режиме БЦО « $\mu S$ » при нажатой кнопке « $\nabla$ » на блоке А6 регулятором «4» выставить значение 200  $\mu s$ ;

в) в режиме БЦО «mmH» регулятором « $\nabla$  mmH» на блоке А5 выставить значение 590;

г) на блоке А6 отжать кнопку « $\nabla$ » и регулятор «4» установить в

исходное крайнее положение.

*Настройка глубиномера для прямого ПЭП по СО-1 и эталонному образцу:*

- 1) подключить к дефектоскопу прямой ПЭП (П111-2,5-К12);
- 2) установить регулятор «4» на блоке А6 (ВП) в среднее положение;
- 3) установить ПЭП на поверхность образца СО-1 над прорезью и получить устойчивое изображение эхо-сигнала. Если на экране нет изображения эхо-импульса от прорези, то необходимо повысить усиление приемного устройства поворотом регулятора «▶» на блоке А8 (ВП) или использовать кнопку аттенюатора «Ослабление dB» на передней панели (ПП) прибора. При этом амплитуда импульса должна быть установлена на стандартный уровень в пределах 2/3 ВШ (пять клеток) табло на экране ЭЛТ;

- 4) застробировать этот донный импульс;

- 5) установить на БЦО режим измерения « $\mu S$ » с дискретностью отсчета 0,01  $\mu S$ ;

- 6) регулятором «0» на блоке А6 установить на БЦО значение 20  $\mu S$  для эталона СО-1 длиной 250 мм (при длине 200 мм – 19  $\mu S$ );

- 7) настроить глубиномер:

*первый способ* – по первому донному импульсу:

- а) установить ПЭП на поверхность металлического образца с известной толщиной, химический состав которого соответствует ОК (т. е. эталонный образец), и получить на экране устойчивое изображение первого донного импульса;

- б) установить амплитуду первого донного импульса на стандартный уровень и застробировать его;

- в) в режиме БЦО «mmH» регулятором « $\nabla$  mmH» на блоке А5 (ВП) выставить значение толщины эталонного образца, измеренное штангенциркулем с точностью  $\pm 0,1$  мм;

*второй способ* – по второму донному импульсу:

- а) установить ПЭП на поверхность эталонного образца и получить на экране изображение второго донного эхо-сигнала, установить амплитуду этого импульса до 2/3 ВШ экрана и застробировать его;

- б) в режиме БЦО «mmH» регулятором « $\nabla$  mmH» на блоке А5 выставить на БЦО удвоенное значение толщины эталонного образца с точностью  $\pm 0,1$  мм;

- 8) оценить точность настройки глубиномера по каждому указанному

выше способу. Для этого измерить глубину залегания отверстия  $\varnothing 6$  мм в СО-2 следующим образом:

- а) установить ПЭП на поверхность СО-2 над боковым отверстием  $\varnothing 6$  мм;
- б) получить на экране устойчивое изображение эхо-сигнала от этого отверстия;
- в) выставить амплитуду импульса до стандартного уровня и застробировать его;
- г) включить на БЦО режим «mmH» и записать показания;
- д) определить погрешности измерения.

*Проведение контроля:*

1) освоить методику настройки глубиномера при использовании прямого и наклонного ПЭП, выполнив указанную последовательность операций по несколько раз. При этом должна быть осмыслена и объяснена сущность всех операций;

2) определить координаты отражателей в виде плоской, вогнуто- и выпукло-цилиндрической поверхностей, а также в виде двугранного угла на образцах из стали марки 20 (по указанию преподавателя) прямым и наклонным ПЭП (с углами и частотами по указанию преподавателя). Для этого необходимо выполнить следующие действия:

- а) нарисовать схемы прозвучивания;
- б) настроить глубиномер разными способами;
- в) получить расчетные формулы для всех схем прозвучивания;
- г) используя указания п. 8 (подготовка к контролю), измерить толщину нескольких объектов контроля и сравнить полученные значения со значениями толщины, измеренными с помощью штангенциркуля. *Если измеряемая толщина ОК меньше (или больше) в два (и более) раза эталонного образца, то для выведения изображения эхо-сигнала на середину экрана нужно использовать регулировку длительности развертки «А» на верхней панели прибора;*
- д) используя указания пункта 7, измерить толщину нескольких ОК, получая на экране изображение второго донного импульса. Результат измерения поделить на два;
- е) используя указания пункта д) (подготовка к контролю), определить

координаты отражателей в разных ОК (по указанию преподавателя).

Полученные значения занести в табл. 4.2.

Таблица 4.2 – Результаты выполнения лабораторной работы

Эскиз образца и схема прозвучивания	ПЭП		Н		Х		У		Расчетные формулы и расчет
	$\alpha$	$f$	СО-2	СО-1	1-й способ	2-й способ	1-й способ	2-й способ	

*Оценка результатов контроля:* Сравнить значения координат, полученных при их измерении ультразвуковым методом и в результате измерения штангенциркулем.

*Отчет должен содержать:*

- 1) методику настройки глубиномера, с описанием каждого шага процесса настройки;
- 2) таблицы с экспериментальными данными;
- 3) выводы.

### Контрольные вопросы

1. Для чего необходимо соблюдать технику безопасности при проведении контроля?
2. Какие органы управления дефектоскопа УД2-12 используются для настройки глубиномера?
3. Как осуществить настройку глубиномера дефектоскопа УД2-12 при работе с прямым ПЭП?
4. Как настроить глубиномер дефектоскопа УД2-12 по эталонным отражателям при работе с наклонным ПЭП, возбуждающим и регистрирующим поперечную волну?
5. Какие этапы включает процесс настройки глубиномера при всех способах?
6. Что такое строб-импульс и для чего он используется?
7. В чем выражаются координаты отражателей (дефектов) при контроле прямым и наклонным ПЭП?

## **Лабораторная работа 5**

### **ПРОВЕДЕНИЕ НАСТРОЙКИ ИЗМЕРИТЕЛЯ КООРДИНАТ ДЕФЕКТΟΣКОПА УД2-12**

*Цель работы* – приобрести навыки использования измерителя координат дефектоскопа УД2-12.

*Аппаратура:* ультразвуковой дефектоскоп УД2-12; пьезоэлектрический преобразователь (ПЭП) типа П121-5,0-65° или П121-5,0-70°, или П121-2,5-50°, или П121-2,5-65°.

*Образцы:* стандартный образец СО-3; комплект стандартных образцов предприятия (СОП); штангенциркуль; линейка; минеральное масло или вода.

#### **Краткие теоретические сведения**

Измерение координат дефекта состоит из трех операций:

а) определение положения ПЭП, соответствующего получению максимального эхо-сигнала от дефекта;

б) измерение с помощью дефектоскопа времени пробега импульса от пьезопластины ПЭП до дефекта;

в) пересчет измеренного времени в координаты дефекта.

Пересчет состоит в том, что по измеренному времени пробега импульса  $t$  находят расстояние  $r$  от ПЭП до дефекта [7, 8]:

$$r = c_t \frac{(t - t_{\Pi})}{2}, \quad (5.1)$$

где  $c_t$  – скорость поперечной волны в изделии;  $t_{\Pi}$  – время пробега импульса в призме ПЭП.

В зависимости от угла ввода  $\alpha$  ультразвуковой волны рассчитывают глубину залегания дефекта  $h$  и расстояние до него вдоль поверхности  $l$ .

$$h = r \cos \alpha; \quad (5.2)$$

$$l = r \sin \alpha. \quad (5.3)$$

В разных конструкциях дефектоскопов используют определенные средства измерения линейных размеров. Это могут быть измерители с

координатными линейками, тогда оператор сам ведет пересчет координат по формулам (5.2) и (5.3). В дефектоскопах типа УД2-12 применяются цифровые системы отсчета с автоматическим пересчетом времени  $t$  в координаты  $X$  и  $Y$ . Один из способов контроля наклонным ПЭП – однажды отраженным лучом. В этом случае координата вдоль поверхности  $l$  определяется непосредственно по шкале  $X$  дефектоскопа. Координата  $h$ , соответствующая глубине залегания дефекта от поверхности, рассчитываются по формуле:

$$h = 2H - Y, \quad (5.4)$$

где  $H$  – толщина ОК;  $Y$  – показание по шкале  $Y$  дефектоскопа.

В современных дефектоскопах используется система прямого измерения координат с помощью глубиномера, который нужно настраивать перед началом измерения по скорости ультразвуковых волн в материале ОК.

При контроле ответственных изделий требуется очень высокая точность измерения координат дефектов. Так, например, для различения в сварных соединениях ложных эхо-сигналов требуется точно определить координаты отражателя и, если они совпадают по геометрии с возможным внутренним дефектом, сделать вывод о наличии дефекта в данной точке шва. Поэтому специалисту ультразвукового контроля нужно знать причины появления погрешности при настройке глубиномера (измерителя координат) и при измерении координат. Расчет погрешности глубиномера и методы ее уменьшения были рассмотрены в лабораторной работе 4.

При выполнении лабораторной работы 5 требуется учесть рекомендации по настройке глубиномера, а также понять причины возникновения погрешности при измерении координат.

### **Порядок и методика выполнения**

Подготовка к контролю:

1) Подготовка дефектоскопа к работе:

- выбрать тип ПЭП в зависимости от предложенного для настройки стандартного образца предприятия:

- при толщине ОК до 12 мм – П121-5,0-65° или П121-5,0-70°;
- при толщине ОК 12–20 мм – П121-5,0-65°;
- при толщине ОК 20–60 мм – П121-2,5-50° или П121-2,5-65°;



2) подключить к дефектоскопу выбранный ПЭП и подготовить прибор к работе в соответствии с технологической картой настройки УД2-12;

3) проверить точку выхода луча ПЭП и одновременно настроить «нуль» глубиномера. Для этого необходимо:

– установить ПЭП на образец СО-3 и, перемещая ПЭП вдоль поверхности контакта и одновременно поворачивая его на угол  $2-3^\circ$  вокруг оси (*при этом уточняется направление луча ультразвуковых колебаний данного ПЭП*), получить максимальный эхо-сигнал от его боковой поверхности;

– проверить совпадение точки выхода луча на ПЭП с нулевой риской СО-3;

– застробировать максимальный эхо-сигнал от боковой поверхности СО-3 и выставить амплитуду импульса на стандартный уровень при помощи кнопок аттенюатора и регулятора «►» на блоке А8;

– переключить блок цифрового отсчета на режим измерения « $\mu S$ » с дискретностью отсчета 0,01 мкс;

– регулятором «Ю» («ушастый» нуль) на блоке А6 выставить на БЦО значение  $\tau = 33,7$  мкс при радиусе образца СО-3  $R = 55$  мм (или  $\tau = 36,8$  мкс при  $R = 60$  мм) – таким образом вводится компенсация акустической задержки в призме выбранного ПЭП (для точного измерения координат отражателей). *При выполнении всех операций необходимо удерживать ПЭП на СО-3 в положении получения максимального эхо-сигнала.*

### **Настройка измерителя координат**

*Грубая настройка:*

1) выбрать по заданию преподавателя стальную пластину (контрольный образец), имеющую прямоугольную поверхность на торце, и измерить линейкой или штангенциркулем ее толщину (координату  $Y_0$ ) с точностью до 0,5 мм;

2) установить ПЭП на верхнюю поверхность пластины и, направив луч ультразвуковых колебаний в нижний угол на ее торце (ближний отражатель), добиться появления на экране отраженного от нижнего угла импульса с максимальной амплитудой (рис. 5.1);

3) установить аттенюатором и регулятором «►» на блоке А8 стандартный уровень эхо-сигнала от ближнего отражателя и

застробировать его;

4) измерить координату  $X_0$  (рис. 5.1) линейкой с точностью до 0,5 мм (координату  $X_0$  нужно отсчитывать от точки ввода луча ПЭП);

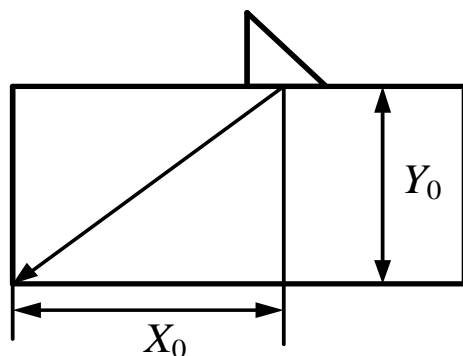


Рисунок 5.1 – Формирование эхо-импульса в ОК от ближнего отражателя

5) переключить БЦО на режим измерения «mmX», и регулятором «mmX» на блоке А5 установить значение, равное измеренному на образце расстоянию  $X_0$  (при этом нужно постоянно поддерживать максимальный эхо-сигнал от отражателя);

6) переключить БЦО на режим измерения «mmY», и регулятором «mmY» на блоке А5 установить значение, равное измеренному на образце расстоянию  $Y_0$  (при этом нужно поддерживать постоянный уровень эхо-сигнала от отражателя);

7) переместить ПЭП по поверхности образца от угла до такого положения, при котором луч ультразвука будет направлен в верхний угол пластины (дальний отражатель), и добиться появления на экране дефектоскопа УД2-12 отраженного от верхнего угла импульса с максимальной амплитудой (рис. 5.2);

8) установить аттенуатором и регулятором «▶» на блоке А8 стандартный уровень эхо-сигнала от дальнего отражателя и застробировать его;

9) измерить координаты полученного эхо-сигнала, последовательно переключая БЦО на режим измерения координат  $X$  и  $Y$  (при этом нужно поддерживать максимальный эхо-сигнал от отражателя);

10) измерить линейкой координаты  $X_1 = 2X_0$  и  $Y_1 = 2Y_0$  от углового отражателя с точностью до 0,5 мм (см. рис. 5.2) и сравнить с показаниями БЦО. Ошибка измерения при грубой настройке допускается до 10 %. Если

полученное значение превышает допустимую погрешность, настройку измерителя координат необходимо повторить.

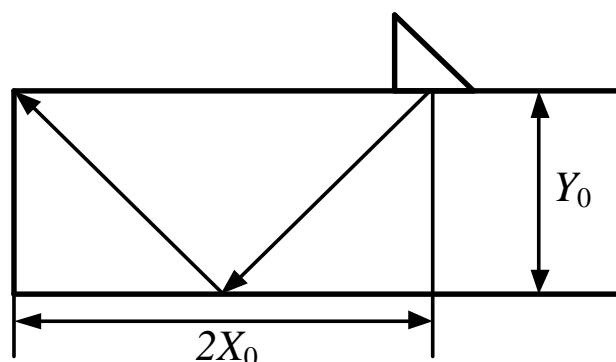


Рисунок 5.2 – Формирование эхо-импульса в ОК от верхнего угла

*Точная настройка:*

1) взять для настройки стальную пластину, имеющую на поверхности с обеих сторон искусственные отражатели в виде поперечной канавки (СОП «с пропилом»), и измерить штангенциркулем ее толщину (координату  $Y_0$ ) с точностью до 0,1 мм;

2) установить ПЭП на верхнюю поверхность пластины и, направив луч ультразвука в нижний «пропил» (ближний отражатель), добиться появления на экране дефектоскопа отраженного от нее импульса с максимальной амплитудой;

3) установить аттенуатором или регулятором «▶» на блоке А8 стандартный уровень эхо-сигнала от ближнего отражателя и застробировать его;

4) измерить штангенциркулем координату  $X_0$  (рис. 5.3) с точностью до 0,1 мм;

5) переключить БЦО на режим измерения «mmX» и регулятором «mmX» на блоке А5 установить точное значение  $X_0$  (при этом нужно поддерживать постоянный уровень эхо-сигнала от отражателя);

6) переключить БЦО на режим измерения «mmY» и регулятором «mmY» на блоке А5 установить точное значение  $Y_0$  (при этом нужно поддерживать максимальное значение амплитуды эхо-сигнала);

7) переместить ПЭП по поверхности образца до такого положения, когда луч ультразвука будет направлен в верхний «пропил» (дальний отражатель), и добиться появления на экране импульса с максимальной

амплитудой (рис. 5.4);

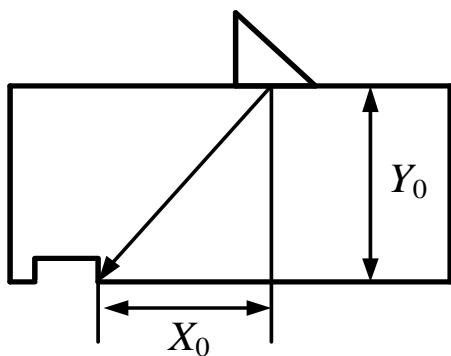


Рисунок 5.3 – Формирование эхо-импульса в ОК от ближнего отражателя

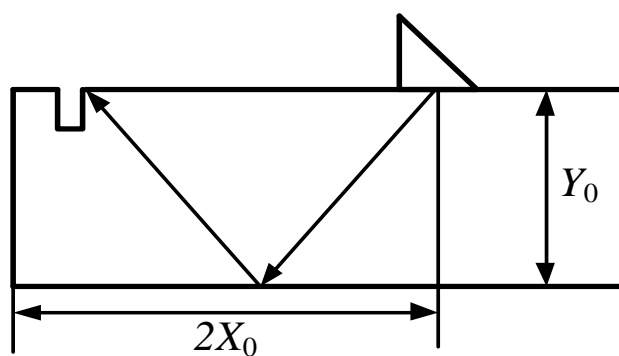


Рисунок 5.4 – Формирование эхо-импульса в ОК от дальнего отражателя

8) установить аттенуатором или регулятором «▶» на блоке А8 стандартный уровень эхо-сигнала от дальнего отражателя и застробировать его;

9) измерить координаты полученного эхо-сигнала по БЦО, последовательно переключая его на режим измерения координат  $X$  и  $Y$ ;

10) измеренные координаты  $X_1 = 2X_0$  и  $Y_1 = 2Y_0$  должны быть в два раза больше установленных значений  $X_0$  и  $Y_0$  с допустимой погрешностью до 5 %. При большей погрешности необходимо повторить настройку измерителя координат.

*Проведение контроля:*

1) выбрать из комплекта СОП образец с отражателями в виде боковых цилиндрических отверстий (по указанию преподавателя), расположенных на различной глубине. Образец должен быть изготовлен из металла, близкого по свойствам металлу СОП с «пропиллом», по которому проводилась настройка измерителя координат;

2) поочередно измерить координаты каждого отражателя прямым лучом, используя указания пункта 3 (подготовка к контролю);

3) измерить линейкой или штангенциркулем координаты каждого из отражателей при установке ПЭП в положение формирования максимального эхо-сигнала. Сравнить полученные данные и заполнить табл. 5.1.

Таблица 5.1 – Результаты измерений

Точная настройка								Проверка настройки											
Образец №								Образец №											
Координаты								Координаты											
действительные				измеренные на БЦО				действительные						измеренные на БЦО					
$X_0$	$Y_0$	$2X_0$	$2Y_0$	$X_0$	$Y_0$	$2X_0$	$2Y_0$	$X_1$	$Y_1$	$X_2$	$Y_2$	$X_3$	$Y_3$	$X_1$	$Y_1$	$X_2$	$Y_2$	$X_3$	$Y_3$
Погрешность								Погрешность											

*Оценка результатов контроля:* провести оценку соответствия дефектоскопа и ПЭП техническим характеристикам, а также обосновать причины появления погрешности в измерении координат.

*Отчет должен содержать:*

- 1) методику настройки измерителя координат;
- 2) таблицу с результатами измерения координат;
- 3) выводы относительно соответствия дефектоскопа и ПЭП техническим характеристикам и причины появления погрешности в измерении координат.

### Контрольные вопросы

1. Какова цель техники безопасности при проведении контроля?
2. Как измерить координаты отражателей при использовании прямого ПЭП?
3. Как измерить координаты отражателей при использовании наклонного ПЭП?
4. Какие способы проверки погрешности глубиномера существуют?
5. В чем заключается процедура измерения координат дефекта?
6. Что относится к систематической погрешности глубиномера?
7. Что относится к случайной погрешности глубиномера?
8. Какие причины приводят к возникновению погрешностей измерения координат отражателей?

**Лабораторная работа 6**  
**ПРОВЕДЕНИЕ НАСТРОЙКИ (ИЛИ ПРОВЕРКА)**  
**ПОРОГОВ СРАБАТЫВАНИЯ ИНДИКАТОРОВ БЛОКА**  
**АВТОМАТИЧЕСКОЙ СИГНАЛИЗАЦИИ ДЕФЕКТОВ**

*Цель работы* – приобрести навыки настройки порогов срабатывания блока автоматической сигнализации дефектов (АСД) дефектоскопа УД2-12.

*Аппаратура:* ультразвуковой дефектоскоп УД2-12; пьезоэлектрический преобразователь типа П111-2,5 или П111-5,0.

*Образцы:* стандартные образцы СО-2 и СО-3; минеральное масло или вода.

**Краткие теоретические сведения**


При ручном ультразвуковом контроле без внешних индикаторов (самописцы, счетчики и т.п.) зону АСД устанавливают в том случае, когда дефектоскопист ограничивает контролируемый участок на экране дефектоскопа с помощью строб-импульса. Кроме временной селекции в блоке АСД реализуется амплитудная селекция путем настройки порогов срабатывания.

В силу этого блок АСД имеет органы настройки, регулирующие:

- начало зоны АСД (начало строб-импульса (СИ));
- ширину зоны АСД (ширину строб-импульса);
- уровень порогов срабатывания АСД.

Индикация зоны АСД в дефектоскопе УД2-12 осуществляется звуковым и световым индикаторами. АСД целесообразно использовать в том случае, когда в ее зону не могут попасть эхо-сигналы от конструктивных элементов объекта контроля или когда протяженность (удаленность) зоны контроля превышает диапазон регулировки временной селекции дефектоскопа.

Так, например, в дефектоскопе УД2-12 суммарный диапазон временной селекции АСД (длительность задержки строба АСД + длительность строба АСД) составляет 400 мкс, что позволяет устанавливать зону контроля стальных ОК толщиной до 2,36 м, поэтому зона АСД и ее индикаторы не используются при УЗК осей колесных пар.

В дефектоскопе УД2-12 используется также амплитудная селекция эхо-сигналов, попадающих на экран электронно-лучевой трубки (ЭЛТ). Она осуществляется по трем регулируемым по высоте экрана пороговым уровням. Превышение застробированным сигналом того или иного уровня АСД отражается на работе светового и звукового индикаторов. Звуковой индикатор срабатывает в том случае, если одновременно нажата кнопка «» на блоке А10

и горит зеленая лампа АСД. При этом исключается пропуск изменения сигнала по амплитуде относительно III уровня срабатывания АСД, даже если зеленая лампа включается на очень короткое время, а глаз дефектоскописта не успевает зафиксировать эхо-сигнал на экране (или по индикатору).

Дефектоскоп УД2-12 позволяет:

- отключать звуковой индикатор;
- использовать не все пороги срабатывания светового индикатора.

Для настройки порогов срабатывания АСД в дефектоскопе предусмотрены три регулятора «под отвертку» («VI», «VII», «VIII») на блоке А10. В общем случае по мере изменения амплитуды застробированного сигнала лампы АСД включаются последовательно (зажигается не более одной лампы).

Каждая лампа АСД горит только тогда, когда значение максимального из застробированных сигналов:

- возрастает до уровня (порога), соответствующего зажиганию данной лампы при достижении сигналом следующего более высокого уровня;
- убывает от более высокого уровня (порога) при достижении сигналом уровня, соответствующего зажиганию данной лампы.

При правильной установке (настройке) порогов срабатывания АСД дефектоскоп УД2-12 позволяет реализовывать регистрацию дефектов в случаях:

- появления на экране ЭЛТ в пределах строба АСД сигнала, превышающего заранее выбранный уровень;
- уменьшения амплитуды застробированного сигнала ниже заранее выбранного уровня.

Первый режим наиболее часто используется при контроле изделий по эхо-методу, второй – при контроле изделий по теневому или зеркально-теневому методу.

При настройке порогов срабатывания АСД необходимо учитывать следующее:

- установку порогов АСД производить только при наличии какого-либо застробированного сигнала;
- настройку необходимо вести последовательно от нижнего или верхнего уровня АСД, так как все три порога взаимосвязаны;
- если при УЗК используют только два порога, то нижний уровень АСД (зеленая лампа) соответствует чувствительности поиска дефекта, а верхний

(желтая лампа) – чувствительности оценки. Красная лампа при этом отключается (крайнее правое положение тумблера «VI» на блоке А10).

### **Порядок и методика выполнения**

*Подготовка к контролю:* подключить ПЭП типа П111-2,5-К12 к дефектоскопу и подготовить прибор к работе в соответствии с технологической картой настройки УД2-12.

*Проведение контроля:*

1) установить ПЭП на поверхность СО-2, получить на экране устойчивое изображение первого донного импульса и застробировать его. *Неизменность амплитуды импульса на экране обеспечивают стабильностью акустического контакта, поэтому нельзя перемещать ПЭП или изменять силу нажатия на него в течение всех последующих операций по настройке.*

2) установить на БЦО режим измерения «dB»;

3) установить регулятор «АМПЛ» на блоке А7 в крайнее правое положение;

4) кнопками аттенюатора «Ослабление» и регулятором «▶» на блоке А8 установить амплитуду эхо-сигнала на восемь больших делений шкалы ЭЛТ;

5) регулятором «▶» на блоке А8 выставить на БЦО значение «dB» в пределах от 00,01 до 00,06;

6) регулятором «АМПЛ» на блоке А7 установить на БЦО значение  $(1 \pm 0,3)$  дБ;

7) регулятором «VI» на блоке А10 с помощью отвертки выставить порог загорания первого (красного) индикатора на передней панели (ПП) прибора;

8) регулятором «АМПЛ» на блоке А7 установить на БЦО значение  $(7 \pm 0,5)$  дБ;

9) регулятором «VII» на блоке А10 с помощью отвертки выставить порог загорания второго (желтого) индикатора на ПП;

10) регулятором «АМПЛ» на блоке А7 установить на БЦО значение  $(13 \pm 0,7)$  дБ;

11) регулятором «VIII» на блоке А10 с помощью отвертки выставить порог загорания третьего (зеленого) индикатора на ПП;

12) произвести проверку правильности установки порогов срабатывания индикаторов АСД следующим образом:

– получить на экране ЭЛТ устойчивый донный импульс на СО-3 и застробировать его;



– регуляторами «АМПЛ» на блоке А7 и «▶» на блоке А8 установить максимальную амплитуду импульса до момента загорания первого (красного) индикатора АСД, при этом на БЦО должно высвечиваться значение амплитуды от 0,7 до 1,3 дБ;

– кнопками аттенюатора «Ослабление» последовательно ввести затухание амплитуды сигнала сначала 6 дБ, затем – 12 дБ. Должны соответственно загораться сначала второй (желтый), затем третий (зеленый) индикаторы АСД. При этом на БЦО должны высвечиваться значения амплитуды: сначала  $(7 \pm 0,5)$  дБ; затем  $(13 \pm 0,7)$  дБ.

В случае несоответствия показаний дефектоскопа указанным выше значениям амплитуды, необходимо повторить настройку по пунктам 3–12.

*Оценка результатов контроля:* оценить соответствие параметров дефектоскопа техническим характеристикам.

*Отчет должен содержать:*

- 1) методику настройки порогов срабатывания АСД;
- 2) результаты проверки настройки;
- 3) выводы о соответствии параметров дефектоскопа техническим характеристикам.

### **Контрольные вопросы**

1. Для чего необходимо соблюдать технику безопасности при проведении контроля?
2. Что такое временная селекция дефектоскопа?
3. Что такое амплитудная селекция дефектоскопа?
4. Каким образом осуществляется временная селекция импульсов в дефектоскопе УД2-12?
5. Каким образом осуществляется амплитудная селекция импульсов в дефектоскопе УД2-12?
6. Какой уровень чувствительности может устанавливаться по I порогу светового индикатора АСД?
7. Какой уровень чувствительности может устанавливаться по II порогу светового индикатора АСД?
8. Какой уровень чувствительности может устанавливаться по III порогу светового индикатора АСД?

**Лабораторная работа 7**  
**ПРОВЕДЕНИЕ НАСТРОЙКИ БЛОКА**  
**ВРЕМЕННОЙ РЕГУЛИРОВКИ ЧУВСТВИТЕЛЬНОСТИ**  
**НА ДЕФЕКТОСКОПЕ УД2-12**

*Цель работы* – приобрести навыки настройки блока временной регулировки чувствительности (ВРЧ).

*Аппаратура:* ультразвуковой дефектоскоп УД2-12; прямой пьезоэлектрический преобразователь типа П111-2,5-К12.

*Образцы:* стальной образец с тремя боковыми цилиндрическими отверстиями; минеральное или вода.

**Краткие теоретические сведения**

Блок ВРЧ в современных дефектоскопах предназначен для генерирования электрического сигнала определенной формы, с помощью которого изменяется во времени усиление одной или нескольких ступеней приемно-усилительного тракта.

Задачей блока ВРЧ является выравнивание чувствительности дефектоскопа в дальней зоне путем получения одинаковых амплитуд эхосигналов от одинаковых отражателей, расположенных на разной глубине. Исходя из этого, закон изменения чувствительности должен быть обратным закону убывания амплитуд отраженных сигналов от одинаковых по размерам дефектов по мере их удаления от ПЭП.

Закон изменения сигнала ВРЧ зависит от размеров и формы отражателя. Так, для отражателя в виде точечного дефекта он имеет вид:

$$K = B_1 t^2 e^{Mt}, \quad (7.1)$$

а при отражении от плоских дефектов больших размеров

$$K = B_2 t^2 e^{Mt}, \quad (7.2)$$

где  $K$  – управляющий сигнал (коэффициент усиления) ВРЧ;  $t$  – время распространения импульса;  $M$  – коэффициент, зависящий от частоты ультразвуковых колебаний;  $B_1, B_2$  – коэффициенты, зависящие от размеров

пьезоэлемента.

Управляющий сигнал ВРЧ часто формируют путем отдельного учета фактора  $t$ , связанного с геометрическим расхождением пучка ультразвука, и фактора  $e^{Mt}$ , связанного с затуханием.

В наиболее совершенных дефектоскопах управляющий сигнал блока ВРЧ, учитывающий первый фактор, подбирают кнопочным переключателем. Он зависит от типа используемого ПЭП и соответствует значению коэффициента  $B_1$  или  $B_2$ , а также длине начального участка, на котором управляющий сигнал сохраняется постоянным в ближней зоне ПЭП. Действие затухания компенсируют другим управляющим сигналом ВРЧ или поворотом линии развертки в приборах с логарифмическим усилением. Причем кривая изменения коэффициента усиления ВРЧ (закон ВРЧ) изображается на прозрачной пластине, которая устанавливается в виде накладной шкалы на экран дефектоскопа.

В дефектоскопе УД2-12 управляющий сигнал ВРЧ подбирают эмпирически по трем точкам в образце с искусственными отражателями или по АРД-диаграмме (диаграмма – «амплитуда – расстояние – диаметр»). Выполняют отдельную регулировку по значению начального, среднего и конечного участков регулируемого сигнала.

Для облегчения настройки и большей наглядности в УД2-12 кривая, показывающая закон изменения ВРЧ, выводится на вторую развертку экрана ЭЛТ.

### **Порядок и методика выполнения**

*Подготовка к контролю:* подключить к дефектоскопу ПЭП типа П111-2,5-К12 и подготовить прибор к работе в соответствии с технологической картой настройки УД2-12.

*Проведение контроля:*

1) установить ПЭП на образец с тремя боковыми отверстиями в положение I и получить на экране максимальный импульс от ближнего к поверхности отверстия (рис. 7.1). Выставить при помощи аттенюатора и регулятора «▶» на блоке А8 амплитуду эхо-сигнала до порога срабатывания первого (красного) индикатора на передней панели прибора;

2) оценить установленную амплитуду  $A_1$ , дБ, по формуле

$$A_I = N_{\text{ат}} - A_{\text{БЦО}}, \quad (7.3)$$

где  $N_{\text{ат}}$  – суммарное ослабление нажатых кнопок аттенюатора, дБ;  $A_{\text{БЦО}}$  – показания БЦО в режиме измерения «dB»;

3) записать полученное значение.

**ВНИМАНИЕ! Студентов: Регулятор «▶» на блоке А8 в дальнейшем использовать запрещается!**

4) переместить ПЭП по поверхности образца в положение III (рис. 7.1, а) и получить максимальный импульс от дальнего отверстия. В случае отсутствия эхо-сигнала на экране проверить соответствие длительности развертки (времени пробега импульса в образце до дальнего отражателя и обратно), т. е. повернуть регулятор «↗» на блоке А6 вправо. При малой амплитуде эхо-сигнала (т. е. менее двух больших клеток на экране ЭЛТ) необходимо уменьшить ослабление аттенюатора;

5) регулятором «⏏» на блоке А10 установить на экране ЭЛТ конец строба АСД по заднему фронту эхо-сигнала  $A_3$  (рис. 7.1, б);

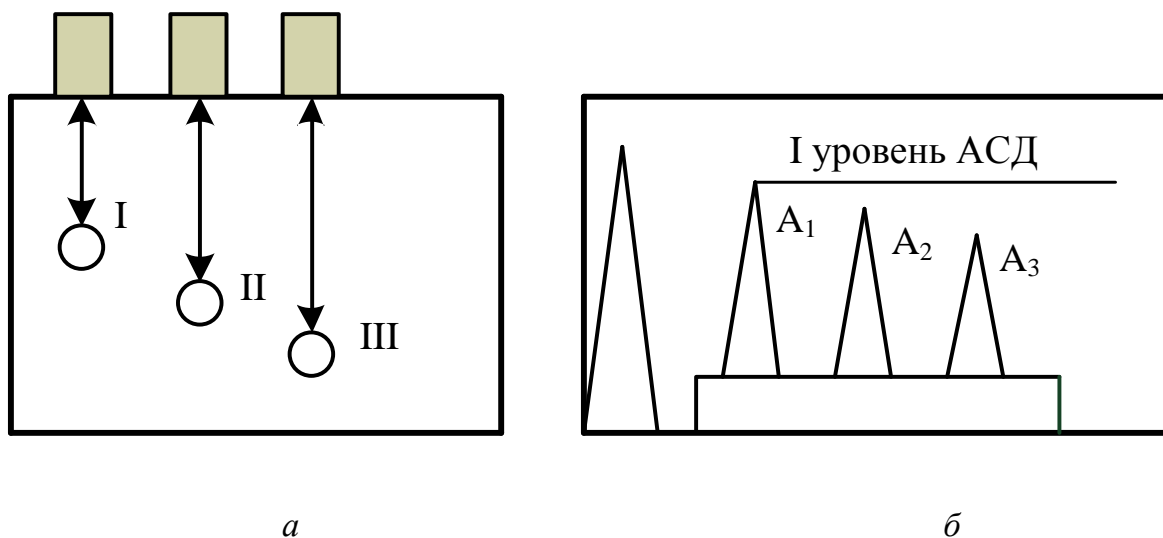





Рисунок 7.1 – Настройка ВРЧ:

а – схема расположения ПЭП при настройке ВРЧ; б – осциллограммы эхо-сигналов от отверстий в образце до включения блока ВРЧ

б) включить вторую развертку ЭЛТ, для этого необходимо нажать кнопку «↗↗» на блоке А6;

7) вывести на экран изображение строба ВРЧ, для этого требуется отжать кнопку «АСД<sup>ВРЧ</sup>» на блоке А10. Затем, вращая регуляторы «» и «» блока А8 по часовой стрелке, поместить над стробом АСД изображение строба ВРЧ на второй (верхней) линии развертки. Если появятся два изображения строба ВРЧ, то нужно оставить второй (правый);

8) регулятором «» на блоке А8 установить передний фронт строба ВРЧ на одной линии с передним фронтом строба АСД;



9) регулятором «» на блоке А8 установить задний фронт строба ВРЧ на одной линии с задним фронтом строба АСД. При этом получившаяся длительность строба ВРЧ не должна быть больше длительности строба АСД (рис. 7.2);



Рисунок 7.2 – Установка фронтов ВРЧ и АСД

10) установить ПЭП на поверхность образца в положение III и получить максимальный импульс от дальнего (III) отверстия. При правильной установке стробов АСД и ВРЧ этот эхо-сигнал должен быть в конце обоих стробов на экране. При несовпадении стробов АСД и ВРЧ повторить настройку по методике пп. 3 –9 (проведение контроля);

11) Регулятором «» на блоке А8 довести амплитуду импульса от дальнего (III) отверстия до уровня амплитуды импульса, полученного от отверстия I (см. п. 2), до загорания первого (красного) индикатора АСД;

12) установить ПЭП на поверхность образца в положение II (рис. 7.1, а) и получить максимальный импульс от среднего (II) отверстия. Амплитуда этого эхо-сигнала  $A_2$  должна соответствовать первому уровню индикации АСД. Если амплитуда от среднего отверстия не достигнет

требуемого уровня, то нужно изменить коэффициент усиления ВРЧ в средней зоне, для чего увеличивать амплитуду импульса от среднего (II) отверстия до тех пор, пока не загорится первый (красный) индикатор АСД;

13) проверить правильность настройки ВРЧ. Для этого последовательно получить на экране эхо-сигналы от I–III отверстий, измерить амплитуды  $A_1$ – $A_3$ , используя формулу (7.3). При правильной настройке  $A_1 = A_2 = A_3$  с отклонением  $\pm 0,5$  дБ.

*Оценка результатов контроля:* оценить необходимость настройки ВРЧ при контроле разных изделий.

*Отчет должен содержать:*

- 1) краткую методику настройки ВРЧ;
- 2) результаты проверки (по амплитудам) с указанием полученной погрешности;
- 3) выводы о необходимости настройки ВРЧ при контроле разных изделий;
- 4) технологическую карту проведения контроля, пример которой приведен в приложении 1.

### **Контрольные вопросы**

1. Для чего необходимо соблюдать технику безопасности при проведении контроля?
2. Что такое чувствительность ультразвукового контроля?
3. Какие виды чувствительности применяют в практике ультразвукового контроля?
4. Какие причины вызывают необходимость применения в дефектоскопах блока ВРЧ?
5. В каких случаях используют ВРЧ?
6. Что означает термин «закон ВРЧ»?
7. От чего зависит коэффициент усиления ВРЧ?
8. Каким образом изменяется усиление приемного тракта дефектоскопа при включении ВРЧ?

## **Лабораторная работа 8**

### **ПОДГОТОВКА ДЕФЕКТΟΣКОПА УД2-12**

### **ДЛЯ КОНТРОЛЯ СТЫКОВЫХ СВАРНЫХ СОЕДИНЕНИЙ**

*Цель работы* – приобрести навыки в подготовке и настройке дефектоскопа для прозвучивания сварных швов прямым и однажды отраженным лучом наклонным ПЭП.

*Аппаратура:* ультразвуковой дефектоскоп УД2-12; пьезоэлектрические преобразователи типов П121-2,5-50°, П121-2,5-65°, П121-5,0-65°, П121-5,0-70°.

*Образцы:* стандартные образцы СО-1, СО-2, СО-3; стандартные образцы предприятия; контрольные сварные соединения (пластины) с дефектами; линейка; штангенциркуль; минеральное масло или вода.

#### **Краткие теоретические сведения**

В ультразвуковой дефектоскопии используют различные типы волн. Продольные волны, как правило, применяют тогда, когда ультразвук необходимо ввести перпендикулярно или под небольшим углом к поверхности, поперечные – когда угол ввода должен быть значительным (35° и более). Это обусловлено удобством возбуждения волн данного типа: продольных – прямым ПЭП или раздельно-совмещенным РС-ПЭП, поперечных – наклонным ПЭП с углом падения волны между первым и вторым критическими углами. Применение поперечных волн предпочтительнее, так как при неизменной частоте у них меньше длина волны, а значит, выше чувствительность к дефектам. Поперечные волны применяют для выявления дефектов, лежащих близко к поверхности. При этом не рекомендуется использовать углы падения ультразвуковых волн на поверхность изделия 60–65°, так как при отражении от дефекта в этом случае происходит трансформация поперечных волн в продольные и снижается амплитуда эхо-сигнала от дефекта. Если необходимо уменьшить затухание ультразвука (например, в крупнозернистых материалах), целесообразно применять продольные волны [7, 8].

Частоту ультразвука выбирают более высокой, если этому не препятствуют большое затухание ультразвуковой волны в ОК и шероховатость его поверхности.

Общее правило выбора частоты ультразвуковых колебаний таково:

тонкостенные изделия из материала с небольшим затуханием контролируют на повышенных частотах (2–10 МГц), толстостенные изделия из материала с большим затуханием – на более низких частотах (1–2 МГц).

Из имеющихся методов УЗК наибольшее применение для контроля металлических изделий находит эхо-метод. Им проверяется более 90 % продукции, контролируемой ультразвуком. Другие методы УЗК применяют там, где эхо-метод трудно использовать, либо – в дополнение к эхо-методу. Основной способ контроля сварных соединений – это прозвучивание всего сечения шва с помощью наклонного ПЭП с поверхности основного металла.

Дефекты в нижней части шва выявляются прямым лучом, в верхней – однажды отраженным лучом.

Перемещают ПЭП поперек и вдоль шва. Для выявления дефектов различной ориентации луч с ПЭП направляют перпендикулярно оси шва, одновременно поворачивая ПЭП вокруг оси на угол  $\varphi_c \pm (10-15)^\circ$ . Для вертикально ориентированных дефектов применяют метод-тандем.

В связи с возникновением при контроле сварных соединений наклонным ПЭП большого количества ложных эхо-сигналов, которые образуются от поверхностных отражателей и от элементов структуры металла шва, от дефектоскописта требуется точное определение координат отражателя, т.е. тщательная настройка дефектоскопа, особенно измерителя координат.

### **Порядок и методика выполнения**

#### *Подготовка к контролю:*

- 1) получить от преподавателя контрольное сварное соединение – ОК заданной толщины;
- 2) выбрать ПЭП, исходя из следующих рекомендаций:
  - при толщине стенки ОК до 12 мм – П121-5,0-65° или П121-5,0-70°;
  - при толщине стенки ОК от 12 до 20 мм – П121-5,0-65° или П121-5,0-70°;
  - при толщине стенки ОК от 20 до 50 мм – П121-2,5-50° или П121-2,5-65°.
- 3) подключить ПЭП к дефектоскопу и подготовить его к работе в соответствии с технологической картой настройки УД2-12;
- 4) проверить условную абсолютную чувствительность дефектоскопа с выбранным ПЭП, для этого необходимо:



– установить регулятор «АМПЛ» на блоке А7 в крайнее правое положение;

– установить ПЭП на поверхность СО-1 с тринадцатью боковыми отверстиями и получить на экране максимальный эхо-сигнал от отверстия, залегающего на глубине 5 мм;

– перемещая ПЭП по поверхности СО-1, последовательно получить на экране эхо-сигналы от отверстий, залегающих на различной глубине. *При этом необходимо с помощью регулятора «▷» на блоке А8 и кнопок аттенюатора «Ослабление» постоянно повышать значение амплитуды эхо-сигнала на экране до стандартного уровня;*

– если ПЭП с частотой 2,5 МГц не позволяет надежно выявлять боковое отверстие, залегающее в СО-1 на глубине 56 мм (ПЭП на 5 МГц – 30 мм), то данный ПЭП не рекомендуется использовать для контроля сварных соединений таких изделий и его необходимо заменить на более чувствительный.

#### *Проведение контроля:*

1) проверить точку выхода и измерить стрелу  $n$  выбранного ПЭП, для этого необходимо:

– установить ПЭП на образец СО-3 и получить максимальный эхо-сигнал от его боковой поверхности, перемещая ПЭП вдоль поверхности контакта и одновременно поворачивая его на угол 2–3° вокруг своей оси. *При этом уточняется направление луча данного ПЭП;*

– проверить совпадение точки выхода луча ПЭП с нулевой рисккой СО-3. *При этом нужно удерживать ПЭП в положении максимального эхо-сигнала.* При их несовпадении можно поставить новую риску на боковой поверхности ПЭП;

– измерить и записать значение стрелы ПЭП в миллиметрах, используя шкалу СО-3;

2) определить возможность использования выбранного ПЭП для схемы прозвучивания сварного шва данного ОК прямым лучом, для этого необходимо:

– установить ПЭП на поверхность ОК вблизи торца, направить луч ультразвука в нижний угол и получить максимальный импульс на экране (рис. 8.1);

– измерить при помощи линейки координату  $X_0$  с точностью до 0,5 мм;

– измерить штангенциркулем максимальную ширину сварного шва на ОК ( $b$ );

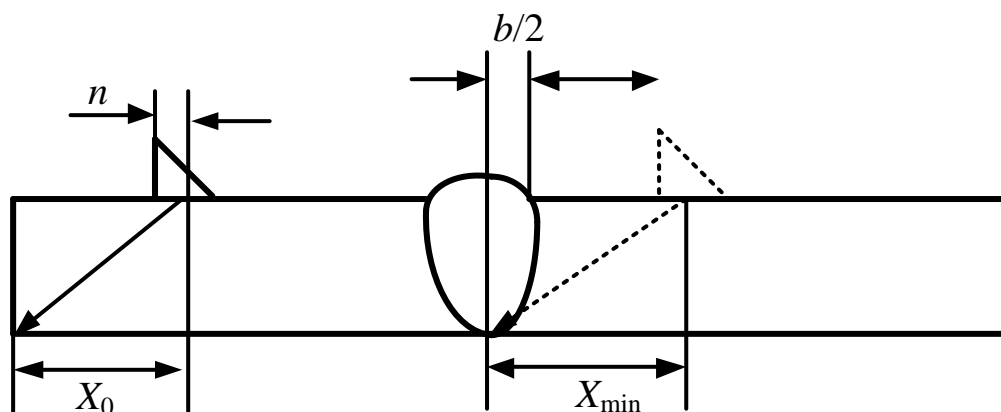


Рисунок 8.1 – Схема прозвучивания сварного шва прямым лучом

– подсчитать расстояние  $X_{\min} = n + b/2$  и сравнить полученное значение с  $X_0$  (рис. 8.1). Если  $X_0 < X_{\min}$ , то прозвучивание прямым лучом невозможно, поэтому необходимо заменить выбранный ПЭП на другой где меньше стрела или больше угол ввода  $\alpha_0$ . При замене ПЭП повторить операции п. 4 (подготовка к контролю) и п. 2 (проведение контроля). Если невозможно подобрать ПЭП, где меньше стрела или больше угол  $\alpha_0$ , то для данного ОК применяют схему прозвучивания одно- и двукратно отраженными лучами (рис. 8.2) и соответственно изменяют методику настройки дефектоскопа;

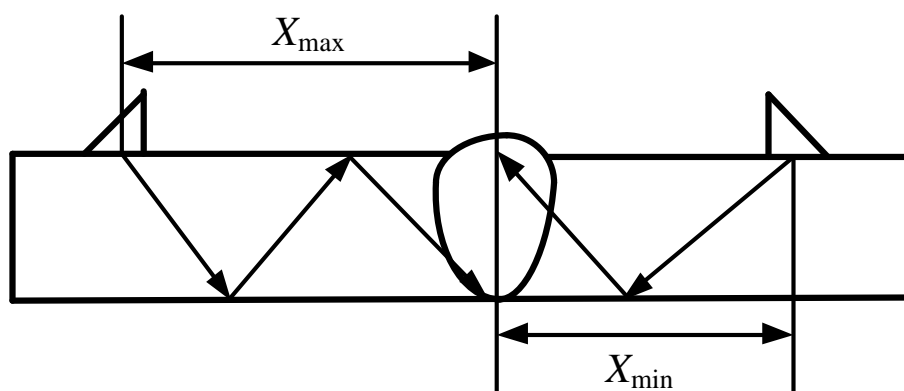


Рисунок 8.2 – Схема прозвучивания одно- и двукратно отраженными лучами

- 3) настроить измеритель координат для выбранного ПЭП;
- 4) настроить зону контроля (зону АСД или зону временной селекции)

на экране, для этого необходимо:

- выбрать СОП с канавками, соответствующий толщине ОК;
- установить ПЭП на СОП, направить луч ультразвука на нижнюю канавку и получить от нее максимальный эхо-сигнал (рис. 8.3, а);
- регулятором «А» на блоке А10 совместить передний фронт строба АСД с передним фронтом полученного сигнала;
- измерить с помощью линейки координату  $X_{\min}$ ;
- переместить ПЭП по поверхности образца от нижней канавки назад и получить максимальный эхо-сигнал от верхней канавки (рис. 8.3, б);
- регулятором «Б» на блоке А10 совместить задний фронт строба АСД с задним фронтом полученного сигнала;
- измерить с помощью линейки координату  $X_{\max}$ . Если применяется схема прозвучивания одно- и двукратно отраженными лучами (см. рис. 8.2), необходимо регулятором «А» на блоке А10 переместить уже настроенный строб АСД (зону контроля) вправо по экрану ЭЛТ до совпадения переднего фронта строба с точкой, где находится задний фронт импульса от верхней канавки. По окончании установки зоны контроля регуляторами развертки блока А6 «растянуть» строб АСД на 80 % ширины экрана для удобства наблюдения за импульсами от дефектов при сканировании сварного шва;

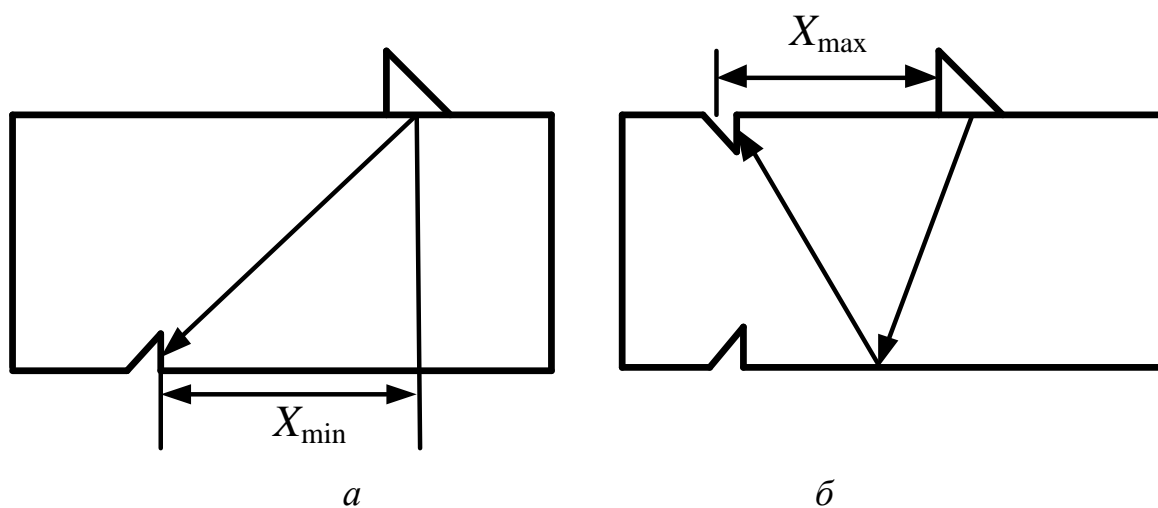


Рисунок 8.3 – Схема определения зоны контроля

5) настроить дефектоскоп на браковочный уровень чувствительности контроля следующим образом:

– установить на аттенуаторе в зависимости от выбранного ПЭП следующие значения ослабления для:

– ПЭП типа П121-5,0-65° или П121-5,0-70° – 6–8 дБ;

– П121-2,5-50° или П121-2,5-65° – 12–16 дБ;

– выбрать СОП с зарубками, соответствующий толщине ОК;

– установить ПЭП на СОП с зарубками, направить луч ультразвука на нижнюю зарубку и получить от нее максимальный устойчивый эхо-сигнал. *Для уточнения положения точки ввода, в которую попадает луч, демпфировать предполагаемую точку пальцем, смоченным минеральным маслом;*

– переключить блок цифрового отсчета на режим измерения «dB»;

– регулятором «АМПЛ» установить максимальную амплитуду зондирующего импульса (если используется ПЭП с частотой 5,0 МГц). При частоте 2,5 МГц положение регулятора «АМПЛ» – среднее;

– аттенуатором и регулятором «▶» на блоке А8 установить амплитуду сигнала от зарубки на уровне восьми больших делений шкалы ЭЛТ до момента загорания красного индикатора АСД, отметить суммарное ослабление на аттенуаторе  $A_{ат}$  в децибелах;

– определить по БЦО минимальное показание  $A_{БЦО}$ , при котором амплитуда от зарубки максимальна, и вычислить значение браковочного уровня по формуле:  $A_{бр} = A_{ат} - A_{БЦО}$ ;

– не меняя положений регуляторов «АМПЛ» и «▶», установить ПЭП на СО-1 и, перемещая его, найти такое положение, при котором значение амплитуды импульса от бокового отверстия, расположенного на определенной глубине,  $A_{СО-1}$  близко к значению амплитуды импульса от зарубки  $A_{бр}$ , т. е.  $A_{СО-1} \approx A_{бр} \pm 0,5$  дБ;

– записать полученные значения условной чувствительности  $K_y$  по СО-1 в миллиметрах ( $K_y$  – глубина залегания отверстия на СО-1, от которого измерялась амплитуда эхо-сигнала) и амплитуды  $A_{СО-1}$  в децибелах. *Если импульс от найденного бокового отверстия в СО-1 будет меньше, чем максимальная амплитуда импульса от зарубки, то необходимо уточнить по показаниям БЦО амплитуду  $A_{СО-1}$  по формуле:  $A_{СО-1} = A_{ат} - A_{БЦО}$ . Если импульс от бокового отверстия СО-1 не попадает в строб АСД, то для стробирования этого импульса можно использовать регулятор ручного стробирования «А» на передней панели дефектоскопа. По окончании*

*измерения амплитуды вернуть этот регулятор в крайнее левое положение;*

б) при толщине стенки ОК более 12 мм необходимо перед выставлением уровня браковочной чувствительности провести настройку режима ВРЧ по методике, изложенной при описании лабораторной работы 7. Вместо образца с тремя отверстиями использовать СОП с канавками, которые будут выполнять функцию ближнего и дальнего отражателя.

*Оценка результатов контроля:* оценить соответствие параметров дефектоскопа техническим характеристикам.

*Отчет должен содержать:*

- 1) методика подготовки УД2-12 для контроля стыковых сварных соединений;
- 2) значения браковочной чувствительности по СОП и условной чувствительности по СО-1;
- 3) выводы;
- 4) технологическую карту проведения контроля, пример которой приведен в приложении 1.

### **Контрольные вопросы**

1. Какова цель техники безопасности при проведении контроля?
2. В каких случаях для УЗК лучше использовать продольные волны?
3. В каких случаях для УЗК лучше использовать поперечные волны?
4. От чего зависит выбор частоты ультразвуковых колебаний для УЗК?
5. Как контролируется сварное соединение наклонным ПЭП?
6. Какие дефекты в сварном соединении выявляются прямым лучом?
7. Какие дефекты в сварном соединении выявляются однажды отраженным лучом?
8. В каких случаях применяют схему прозвучивания однажды и двукратно отраженным лучом?
9. Для чего определяются при настройке дефектоскопа координаты  $X_{\min}$ ,  $X_{\max}$  на поверхности ОК?

## **Лабораторная работа 9**

### **ПРОВЕДЕНИЕ КОНТРОЛЯ СТЫКОВЫХ СВАРНЫХ СОЕДИНЕНИЙ МАЛОЙ ТОЛЩИНЫ**

*Цель работы* – приобрести навыки контроля стыковых сварных соединений дефектоскопом УД2-12.

*Аппаратура:* ультразвуковой дефектоскоп УД2-12; пьезоэлектрический преобразователь типа П121-5,0-65° или П121-5,0-70°.

*Образцы:* контрольные образцы стыкового сварного соединения; стандартные образцы предприятия; стандартные образцы СО-1, СО-2 и СО-3; линейка; штангенциркуль; минеральное масло или вода.

#### **Краткие теоретические сведения**

Сварные соединения относятся к наиболее сложным объектам контроля. Это связано, прежде всего, со сложной геометрией соединения и наличием мешающих контролю конструктивных элементов. Ломаный контур разделки металла под сварку, различные свойства наплавленного и основного металлов, выступающие за пределы контролируемого объекта выпуклости (усиление, провисание) сварного шва, неудаляемые прокладки, наплавляемые покрытия искажают траекторию прохождения ультразвукового луча, обуславливают потерю им энергии на границе раздела, вызывают появление ложных сигналов. Ориентация характерных дефектов по отношению к поверхности ввода ультразвука и разнообразная конфигурации дефектов (от идеально плоской до идеально круглой), а также различная их «прозрачность» требуют усложнения схем прозвучивания.

Отмеченные особенности конструкции и свойства сварных соединений определяют различные методические решения их дефектоскопии.

При контроле стыковых сварных соединений из стали с толщиной свариваемых элементов 8–12 мм нужно учитывать то, что такие соединения выполняют односторонней сваркой и наиболее часто в них образуются такие дефекты, как непровары в корне шва. В то же время

часто возникает провисание наплавленного металла («провис») в корне шва или превышение проплава. При контроле прямым лучом совмещенным ПЭП на экране дефектоскопа появляются эхо-сигналы от «провисов», совпадающие по времени с эхо-сигналами, отраженными от некорневых дефектов, обнаруженных однажды отраженным лучом.

Так как ультразвуковая волна распространяется довольно широким пучком, который при малой толщине заготовок захватывает все сечение шва, различить эхо-сигналы от «провиса» и от дефекта практически невозможно, т. е. в центре шва образуется неконтролируемая зона, размер которой связан с размером «провиса». Если надкорневой дефект имеет плоскую форму, то амплитуда эхо-сигнала от него соизмерима с амплитудой от «провиса» и при углах ввода преобразователя 50–60° возможна перебраковка ОК до 80 %. При углах ввода ПЭП 40 и 70° перебраковка снижается до 20 %, так как «провис» при таких углах имеет низкую отражательную способность, следовательно, если у дефектоскописта возникают сомнения о наличии дефекта над корнем шва, необходимо изменить угол ввода ПЭП на 40–42 или 70°. При этом дефектоскопист должен хорошо знать технологический процесс сварки ОК.

Если в сварном соединении будет непровар в корне шва, то для различения эхо-сигналов от такого дефекта и от «провиса» необходимо более тщательно выставить зону АСД и настроить измеритель координат таким образом, чтобы импульс от непровара появлялся в начале зоны.

Эхо-импульс от «провиса» приходит на экран несколько позднее (рис. 9.1,  $t_1 < t_2$ ), поэтому значения его координат, измеряемых дефектоскопом, будут больше реальных, хотя положение ПЭП оставалось неизменным. Дефектоскопист должен отмечать на участках контроля зоны, где могут быть сигналы от провисаний металла, характерных при выполнении потолочных и вертикальных швов. В случае появления эхо-сигналов в этих зонах необходимо уточнять координаты предполагаемого дефекта и оценивать возможность их возникновения при данном положении ПЭП.

В сварных стыковых соединениях иногда возникает смещение кромок, и эхо-сигнал от смещения кромок может быть ошибочно принят за

корневой дефект. Такие эхо-сигналы появляются при сканировании только с одной стороны шва и выявляются почти по всей его протяженности. С другой стороны шва пучок ультразвуковых колебаний не отражается от кромки, и эхо-сигнал от нее не формируется.

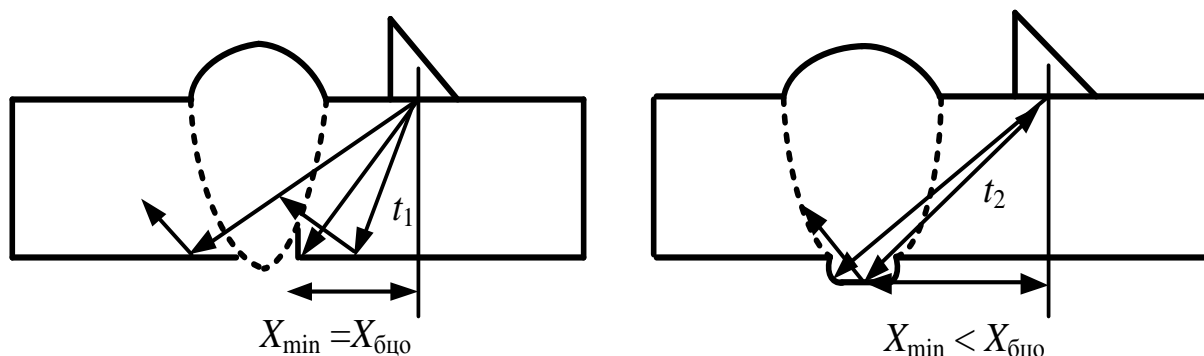


Рисунок 9.1 – Формирование эхо-сигнала от провиса

Кроме того, при работе с наклонными ПЭП, имеющими большие углы ввода ультразвука (более  $60^\circ$ ), возникают импульсы помех, обусловленные поверхностными волнами. В сварных соединениях поверхностная волна отражается от валика усиления шва и может создать на экране импульс большой амплитуды, попадающий даже в зону АСД. Установить факт появления на экране таких импульсов можно путем «демпфирования» пальцем поверхности контроля вокруг ПЭП. При распространении ультразвука по поверхности объекта прикосновение к ней пальца, смоченного контактирующей жидкостью, будет вызывать отток части энергии поверхностной волны и в случае пересечения пальцем направления распространения волны амплитуда эхо-сигнала от отражателя будет резко падать. Таким же образом на сварном шве определяется место, от которого ультразвуковая волна отражается: об этом будет свидетельствовать уменьшение амплитуды сигнала на экране дефектоскопа. При касании пальцем поверхности ОК «за отражателем» амплитуда сигнала не изменится.

Чтобы точно оценивать размеры дефектов, необходимо настраивать чувствительность дефектоскопа по стандартному образцу предприятия. Он



должен изготавливаться из того же металла, что и сварное соединение, иметь угловой отражатель типа «зарубка», размеры которой зависят от толщины ОК. «Зарубка» имитирует самый опасный дефект сварного соединения – непровар в корне шва. Она заменяет плоскодонное отверстие, поэтому эквивалентный размер других дефектов в шве можно сравнивать по амплитуде эхо-сигналов от них с амплитудой эхо-сигнала от «зарубки». Таким образом определяется наличие любых дефектов в сварном соединении.

Помимо оценки размеров отражателей или эквивалентной площади дефектов в сварных соединениях нужно измерять их условную протяженность и условное расстояние между дефектами. Условной протяженностью дефекта  $\Delta l$  в каком-либо направлении называют максимальное расстояние между его условными границами в данном направлении. В сварных соединениях наибольшая протяженность дефекта наблюдается чаще всего в направлении шва. Для ее определения нужно перемещать ПЭП вдоль шва, отмечая точки на поверхности шва и измеряя расстояние между этими точками, в которых амплитуда эхо-сигнала от дефекта на 6 дБ меньше амплитуды, получаемой от дефекта в положении ПЭП, соответствующему ее максимальному значению.

Для выравнивания чувствительности при контроле наклонным ПЭП однажды отраженным лучом необходимо использовать систему ВРЧ. Но в сварных соединениях с толщиной элементов до 12 мм разрешается работать без применения ВРЧ, так как дефекты в верхней части шва (поры и шлаковые включения) по своим размерам могут быть больше, чем корневые дефекты, поэтому недобраковки ОК не происходит.

### **Порядок и методика выполнения**

#### *Подготовка к контролю:*

- 1) определить основные параметры выданного для контроля образца сварного соединения: толщину основного металла  $S$  и ширину валика усиления сварного шва  $B$ ;
- 2) выбрать рабочую частоту контроля и тип ПЭП в соответствии с указаниями, приведенными в лабораторной работе 8 (подготовка к

контролю);

3) подключить выбранный ПЭП к дефектоскопу и подготовить прибор к работе в соответствии с технологической картой настройки УД2-12;

*Проведение контроля:*

1) установить «нуль» глубиномера в соответствии с указаниями, приведенными в лабораторной работе 5 (подготовка к контролю);

2) проверить точку выхода луча ультразвука и измерить стрелу ПЭП в соответствии с указаниями, приведенными в лабораторной работе 8 (проведение контроля);

3) определить точное значение угла ввода луча ультразвука  $\alpha_0$  по СО-2 следующим образом:

– установить ПЭП на поверхность СО-2 над браковочным отверстием диаметром 6 мм, залегающим на глубине 44 мм, направить луч ультразвука в его центр и получить от него максимальный эхо-сигнал;

– застробировать полученный эхо-сигнал от бокового отверстия СО-2 и выставить амплитуду импульса на стандартный уровень при помощи кнопок аттенюатора и регулятора «►» на блоке А8. *При углах ввода ультразвукового луча больше 60°, если не удастся добиться стандартного уровня эхо-сигнала на экране, необходимо перевернуть СО-2 и установить ПЭП на поверхность, от которой боковое отверстие диаметром 6 мм залегает на глубине 15 мм;*

– отсчитать по шкале СО-2 значение измеренного угла ввода  $\alpha_0$ ;

4) определить границы зоны перемещения ПЭП при сканировании данного сварного соединения  $X_{\min}$  и  $X_{\max}$  по формулам:

$$X_{\max} = S \operatorname{tg} \alpha_0, \quad X_{\max} = S \operatorname{tg} \alpha_0; \quad (9.1)$$

$$X_{\min} = X_{\max} - \frac{b}{2} - n, \quad X_{\min} = X_{\max} - b/2 - n. \quad (9.2)$$

Формула (9.1) используется в случае положения ПЭП для прозвучивания однажды отраженным лучом, а формула (9.2) – для положения ПЭП при прозвучивании корня шва прямым лучом.

Если  $X_{\min}$  получается меньше нуля, следовательно, нужно выбрать

ПЭП с большим углом ввода;

5) настроить измеритель координат по СОП в соответствии с указаниями, приведенными в лабораторной работе 5 (настройка измерителя координат, точная настройка);

6) установить зону АСД по СОП с «зарубками» согласно указаниям в лабораторной работе 8.

7) выставить предельную (браковочную) чувствительность по нижней «зарубке» СОП в соответствии с указаниями приведенными в лабораторной работе 8 (проведение контроля), измерить и записать амплитуду браковочного уровня в децибелах. Также записать соответствующую условную чувствительность  $K_y$  по СО-1;

8) осмотреть сварное соединение со стороны корня шва и запомнить места расположения видимых корневых дефектов;

9) подготовить ОК к контролю, разметить зону сканирования ( $X_{\min} - X_{\max}$ ) с обеих сторон шва, закрепить с одной стороны узкую бумажную ленту, а с другой – нанести слой контактной жидкости;

10) провести контроль сварного соединения с обеих сторон шва, выбрав такую скорость сканирования, чтобы на экране ЭЛТ были хорошо заметны эхо-сигналы отмеченных при визуальном осмотре дефектов в корне шва. Сканирование проводят по поперечно-продольной схеме перемещения ПЭП с шагом 2–4 мм. *Если дефекты слабо фиксируются дефектоскопом, то следует увеличить поисковую чувствительность. Для этого нужно отпустить одну или две кнопки аттенюатора (в сумме на 2–4 дБ) и записать выставленный поисковый уровень;*

11) при обнаружении дефекта восстановить суммарное ослабление кнопками аттенюатора (если они отжимались при поиске), отметить на бумажной ленте протяженный дефект двумя поперечными линиями, а непротяженный – одной поперечной линией, произвести оценку каждого дефекта, т.е. измерить амплитуду эхо-сигнала и координаты  $X$  и  $Y$  и записать полученные значения. *Оцениваются только те дефекты, амплитуда эхо-сигналов от которых превышает поисковый уровень (загорается желтая лампочка индикатора АСД);*

12) отметку на дефектограмме и запись измеренных параметров каждого дефекта производить с обеих сторон сварного шва.

*Оценка результатов контроля:* произвести оценку каждого дефекта, т.е. измерить амплитуду эхо-сигнала и координаты  $X$  и  $Y$  и записать полученные значения.

*Отчет должен содержать:*

- 1) параметры настройки дефектоскопа;
- 2) дефектограмму с таблицей параметров дефектов, обнаруженных в данном образце сварного соединения.
- 3) выводы.

### **Контрольные вопросы**

1. Перечислите основные положения техники безопасности и охраны труда.
2. Почему сварные соединения относятся к сложным объектам контроля?
3. Почему для контроля сварных соединений чаще всего используют наклонные ПЭП?
4. Какие схемы прозвучивания сварных соединений применяют?
5. Какие дефекты возникают в сварных швах наиболее часто?
6. Какие факторы способствуют образованию ложных импульсов при контроле сварных соединений?
7. Как можно отличить эхо-сигнал от смещения кромок от корневого дефекта?
8. Как можно отличить эхо-сигналы от дефектов, расположенных в верхней части шва, от эхо-сигналов, вызванных отражением ультразвуковой волны от валика усиления шва?
9. Какие параметры измеряются у дефекта, дающего эхо-сигнал на оценочном уровне?
10. Как понимаете выражение «выровнять чувствительность при работе с наклонным ПЭП»?

## **ЗАКЛЮЧЕНИЕ**

Учебно-методическое пособие «Акустический контроль» по курсу «Приборы и методы акустического контроля» предназначено для студентов электромашиностроительного факультета, обучающихся в соответствии с учебными планами специальности «Приборы и системы неразрушающего контроля».

Практика эксплуатации и ремонта деталей подвижного состава показала, что наилучших результатов достигают в работе те специалисты, которые освоили не только теоретический курс знаний, но и в ходе обучения выполняли практические и лабораторные работы. Приобретенные теоретические знания позволят студентам не только качественно подготовиться к выполнению и сдаче лабораторных работ по данному разделу, но и успешно применять полученные навыки на производстве. В связи с тем, что в настоящее время много внимания уделяется развитию неразрушающих методов контроля и Украина вступила в международное экономическое пространство, от хорошего современного специалиста требуется постоянная заинтересованность научным поиском, связанным с развитием технологии, модернизацией и реновацией машиностроения.

# ПРИЛОЖЕНИЕ 1

## Модель технической карты

### Метод НК: ультразвуковой (УТ)

1. ПАРАМЕТРЫ ОБЪЕКТА КОНТРОЛЯ		6. ПАРАМЕТРЫ НАСТРОЙКИ ДЕФЕКТΟΣКОПА																			
		Параметры проведения контроля				Скорость развѐртки		Опорный уровень (чувствительность)						Параметры сканирования							
		Схема контроля по ГОСТ 14782	Контролируемая толщина ОК, мм	Параметры ПЭП			Метод настройки	Образец для настройки	Макс. диапазон контроля, мм	Настройка чувствительности по:	Тип опорного отражателя	Размеры опорного отражателя, мм (мм <sup>2</sup> )	Поправка к усилению для обеспечения браковочного уровня, dB	Условная чувствительность по СО-2, h = 44 мм, dB	Глубина ВРЧ, dB	Контрольный уровень чувствительности, dB	Поисковый уровень чувствительности, dB	Расстояние Хк, мм	Расстояние Хмакс, мм	Шаг сканирования а, мм	
				Излучатель, D мм (S мм <sup>2</sup> )	Частота, f, МГц	Угол ввода УЗ-волны, α°															
Наименование объекта НК																					
Материал	Сталь 20																				
Состояние поверхности объекта контроля	механическая зачистка																				
Размеры узла (длина L, ширина H, диаметр D), мм	L=320, H=280																				
Тип сварного соединения по ГОСТ 16037-80	С 17																				
Вид сварки согласно ДСТУ 2944-94	РДЭ (111)																				
Толщина свариваемых элементов, мм	18/18																				
Макс. допустимая ширина валика усиления, мм	32																				
Ширина зоны зачистки под контроль, мм	127																				
Длина (периметр) сварного шва l, мм	320																				
Наличие и способ термообработки	–																				
2. ЭСКИЗ ОБЪЕКТА КОНТРОЛЯ		7. СИСТЕМА КООРДИНАТ ОК, НАСТРОЙКА ДЛИТЕЛЬНОСТИ РАЗВЕРТКИ И УРОВНЯ ЧУВСТВИТЕЛЬНОСТИ																			
<p>Рисунок 1</p> <p>Рисунок 2</p>		<p>Рисунок 3</p> <p>Рисунок 4</p>																			
3. УСЛОВИЯ ПРОВЕДЕНИЯ И ОБЪЁМ КОНТРОЛЯ		8. ПРОЦЕДУРА ПРОВЕДЕНИЯ КОНТРОЛЯ																			
Уровень контролепригодности ОК	III гр. по СОУ-Н МПЕ 40.1.17.302:2005	1. Внешний осмотр, уточнение идентиф. номера ОК, точки начала отсчёта и системы координат.																			
Объём контроля сварного соединения	100% СШ и ЗТВ кроме краевой зоны ≤ 10 мм	2. Проверка параметров объекта контроля согласно п. 1:																			
Контролируемый объём в сварном соединении	согласно рис. 2	2.1. Геометрические размеры объекта контроля;																			
Температура на поверхности ОК	18-30 °С	2.2. Состояние поверхности ОК в зоне сканирования;																			
4. ТРЕБОВАНИЯ К ОБЪЕКТУ И ПРОВЕДЕНИЮ КОНТРОЛЯ		2.3. Толщина свариваемых элементов в зоне контроля;																			
Квалификация персонала по НК	I - III уровень согласно НПАОП 0.00-6.14-97	2.4. Максимальная ширина валика усиления;																			
Общие требования к проведению контроля	согласно ГОСТ 14782-86	2.5. Ширина зоны зачистки под контроль.																			
Методика контроля	СОУ-Н МПЕ 40.1.17.302:2005	3. Проверка основных параметров аппаратуры и настройка чувствительности дефектоскопа по п. 6																			
Нормы оценки качества	СОУ-Н МПЕ 40.1.17.302:2005	4. Проведение контроля объекта:																			
Требования к оформлению отчёта	согласно СОУ-Н МПЕ, прилож. М	4.1. Сканирование сечения сварного шва согласно выбранных позиций прозвучивания;																			
5. АППАРАТУРА И ИНСТРУМЕНТЫ		4.2. Измерение параметров обнаруженных индикаций и их местоположения относительно системы координат;																			
Дефектоскоп	УД2-70/USN-52	4.3. Фиксирование полученных результатов контроля в оперативном журнале.																			
Пьезоэлектрические преобразователи (ПЭП)	П121-2,5-65-М	5. Оформление протокола контроля. 6. Оценка качества изделия																			
Государственные стандартные образцы (ГСО)	СО-1, СО-2, СО-3 (V1, V2)																				
Стандартный образец предприятия (СОП)	СОП с "зарубкой", S <sub>зав</sub> =5,0 мм <sup>2</sup>																				
Способ настройки чувствительности	по СОП с применением ВРЧ																				
Измерительный инструмент	линейка Л-300/ штангенциркуль ШЦ-I																				
Контактная жидкость	машинное масло																				
		ТЕХНОЛОГИЧЕСКУЮ КАРТУ РАЗРАБОТАЛ:																			
				Фамилия, инициалы				Подпись												№ сертификата	

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Контроль неразрушающий. Методы акустические Общие положения : ГОСТ 20415-82. – Взамен ГОСТ 200415-75; переизд. март 1991 / Госкомитет СССР по управл. качеством продукции и стандартам. – [Действующий с 1983-07-01]. – М.: Изд-во стандартов, 1991. – 4 с.
2. Ермолов И.Н. Ультразвуковой контроль : учебник для специалистов первого и второго уровней квалификации / И. Н. Ермолов, М. И. Ермолов. – изд. 2-е, испр. – М., 1998. – 209 с.
3. Клиндух В.Ф. Неразрушающие методы контроля и диагностики узлов и деталей подвижного состава : учеб. пособ. / В.Ф. Клиндух, В.М. Макиенко, Е.Н. Кузьмичев. – Хабаровск: изд – во ДВГУПС, 2006. – 111 с.
4. Кретов Е. Ф. Ультразвуковая дефектоскопия в энергомашиностроении / Е.Ф. Кретов. – СПб: ООО «Радиоавионика», 1995. – 317 с.
5. Руководство по комплексному ультразвуковому контролю колесных пар вагонов РД 07.09-97: Утв. Департ. вагон. хоз-ва МПС России 13.09.97: ввод в действие 01.09.98 / МПС РФ Департ. вагон. хоз-ва, Департ. пас. сообщ. – М., 1997.
6. Ахмеджанов Р. А. Контроль технического состояния деталей вагонов / Р. А. Ахмеджанов / Омский гос. ун-т путей сообщения. – Омск, ОМГАПС, 1996 – 139 с.
7. Марков А.А. Ультразвуковая дефектоскопия рельсов / А.А. Марков, Д. А. Шпагин. – М. : Образование и культура, 1999. – 230 с.
8. Криворудченко В. Ф. Современные методы технической диагностики и неразрушающего контроля деталей и узлов подвижного состава железнодорожного транспорта / В. Ф. Криворудченко, Р.А. Ахмеджанов. – М.: Маршрут, 2005. – 436 с.

## СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ.....	3
РАЗДЕЛ 1. ОСНОВНЫЕ ПОНЯТИЯ ОБ УЛЬТРАЗВУКЕ .....	5
РАЗДЕЛ 2. ВОЗБУЖДЕНИЕ И ПРИЕМ УЛЬТРАЗВУКОВЫХ КОЛЕБАНИЙ.....	9
2.1. Понятие о пьезоэффекте.....	9
2.2. Понятие о добротности.....	15
2.3. Понятие о направленности.....	15
РАЗДЕЛ 3. СВОЙСТВА УЛЬТРАЗВУКОВЫХ КОЛЕБАНИЙ.....	19
3.1. Затухание ультразвуковых колебаний.....	19
3.2. Отражение ультразвуковых колебаний (при нормальном падении волн).....	22
3.3. Преломление и трансформация ультразвуковых колебаний (при наклонном падении волн).....	23
РАЗДЕЛ 4. ИМПУЛЬСНЫЙ РЕЖИМ ИЗЛУЧЕНИЯ УЛЬТРАЗВУКОВЫХ КОЛЕБАНИЙ .....	27
РАЗДЕЛ 5. ЭХО-МЕТОД УЛЬТРАЗВУКОВОГО КОНТРОЛЯ.....	33
РАЗДЕЛ 6. ОТРАСЛЕВЫЕ СТАНДАРТНЫЕ ОБРАЗЦЫ.....	45
6.1. Стандартный образец СО-1.....	45
6.2. Стандартный образец СО-2.....	46
6.3. Стандартный образец СО-3.....	47
6.4. Настройка параметров контроля.....	49
6.5. Определение «мертвой» зоны.....	52
6.6. Точность работы глубиномера.....	53
6.7. Условная чувствительность.....	55
РАЗДЕЛ 7. ОСНОВЫ РАБОТЫ С УЛЬТРАЗВУКОВЫМ ДЕФЕКТОСКОПОМ ТИПА УД2-12.....	57
7.1. Инструкция по соблюдению техники безопасности и охраны труда.....	57
7.2. Техническая характеристика ультразвукового дефектоскопа типа УД2-12.....	58



## ЛАБОРАТОРНЫЕ РАБОТЫ

Лабораторная работа 1. Определение скорости распространения ультразвуковых волн в твердых телах.....	69
Лабораторная работа 2. Определение затухания ультразвуковых волн.....	79
Лабораторная работа 3. Построение диаграммы направленности пьезоэлектрического преобразователя.....	88
Лабораторная работа 4. Проведение настройки глубиномера ультразвукового дефектоскопа типа УД2-12.....	94
Лабораторная работа 5. Проведение настройки измерителя координат дефектоскопа УД2-12.....	103
Лабораторная работа 6. Проведение настройки (или проверка) порогов срабатывания индикаторов блока автоматической сигнализации дефектов.....	110
Лабораторная работа 7. Проведение настройки блока временной регулировки чувствительности на дефектоскопе УД2-12.....	114
Лабораторная работа 8. Подготовка дефектоскопа УД2-12 для контроля стыковых сварных соединений.....	119
Лабораторная работа 9. Проведение контроля стыковых сварных соединений малой толщины.....	126
ЗАКЛЮЧЕНИЕ.....	133
ПРИЛОЖЕНИЕ 1.....	134
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ.....	135

Навчальне видання

СУЧКОВ Григорій Михайлович  
НОЗДРАЧОВА Катерина Леонідівна

## **АКУСТИЧНИЙ КОНТРОЛЬ**

Навчальний посібник  
(російською мовою)

Відповідальний за випуск *С. М. Глоба*  
Роботу до видання рекомендував *В.І. Мілих*  
Редактор *Л.А. Пустовойтова*

План 2013 р., поз 18.

Підп. до друку 15.10.2013. Формат 60×84 1/16. Папір офісний.  
Riso-друк. Гарнітура Таймс. Ум. друк. арк.7,4 . Наклад 100 прим.  
Зам №\_\_\_\_\_. Ціна договірна.

---

Видавець і виготовлювач  
Видавничий центр НТУ „ХПІ”.  
вул. Фрунзе, 21, м. Харків -2, 61002

Свідоцтво суб'єкта видавничої справи ДК № 3657 від 24.12.2009 р.